



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA**

**ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN  
DESHIDRATADOR SOLAR COMBINADO (TÉRMICO-  
FOTOVOLTAICO) PARA EL TRATAMIENTO DE ARROZ**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

P R E S E N T A:

**José David Gama Pérez**

Tutor: Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa



2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# DEDICATORIAS

A mis padres por su cariño y apoyo que siempre me han brindado.

A mis hermanos Juana, Rafael y Miguel por haberme apoyado incondicionalmente no solo durante mis estudios sino durante toda mi vida.

# AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, y al gobierno del Estado de Morelos, que a través del programa de Fondos Mixtos, FOMIX, acordó otorgar el financiamiento necesario para la realización de este trabajo, dentro del proyecto: Tecnologías Innovadoras para el Secado Solar de Arroz, clave MOR-2004-002-057

Al Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa por su asesoría y apoyo para la realización de este trabajo.

A los miembros del jurado: Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco, Dr. Octavio García Valladares, Dr. Rosenberg J. Romero Domínguez y Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez.

A la coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor del Departamento de Sistemas Energéticos del CIE (Centro de Investigación en Energía) por las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

A todos mis compañeros y amigos del laboratorio de refrigeración por su apoyo y consejos, pero sobre todo por su amistad, un agradecimiento especial para Víctor Hugo Gómez por su gran colaboración con mi trabajo.

# ÍNDICE

Índice	i
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	ix
Presentación	x
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1.1 El arroz en el mundo	1
1.1.2 Valor nutricional	2
1.1.3 El arroz en México	5
<b>1.2 EL SECADO DE GRANOS</b>	<b>8</b>
1.2.1 La importancia del secado	8
1.2.2 El secado de arroz	10
1.2.2.1 Condiciones iniciales de secado	10
1.2.2.2 Proceso de secado	10
<b>1.3 ESTUDIO DEL SECADO DE ARROZ EN EL ESTADO DE MORELOS</b>	<b>12</b>
1.3.1 Tipos de secado	12
1.3.1.1 Secado en patio (asoleamiento)	12
1.3.1.2 Secador tipo cascada	14
1.3.1.3 Secado en deposito en reposo (silo)	16
<b>1.4 PROBLEMÁTICA DEL SECADO DE ARROZ</b>	<b>17</b>
<b>1.5 JUSTIFICACIÓN Y PROPUESTA DE ESTUDIO</b>	<b>18</b>
<b>1.6 OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
1.6.1 Objetivo general	19
1.6.2 Objetivos específicos	19
<b>CAPÍTULO II SECADO DE GRANOS</b>	
<b>2.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO</b>	<b>21</b>
2.1.1 Psicrometría	21
2.1.1.1 Introducción	21
2.1.1.2 Aire atmosférico	21
2.1.1.3 Propiedades termodinámicas del aire húmedo	22
2.1.1.3.1 Temperatura de bulbo seco	23
2.1.1.3.2 Temperatura de punto de rocío	23
2.1.1.3.3 Temperatura de bulbo húmedo	23
2.1.1.3.4 Presión de vapor	23
2.1.1.3.5 Razón de humedad	23
2.1.1.3.6 Humedad relativa	23

2.1.1.3.7	Grado de saturación	23
2.1.1.3.8	Entalpía	23
2.1.1.3.9	Volumen específico	24
2.1.1.4	Aparatos psicrométricos	24
2.1.1.4.1	Psicrómetro	24
2.1.1.5	Diagramas psicrométricos	25
2.1.1.5.1	Diagrama Carrier	26
2.1.1.5.2	Diagrama Mollier	26
2.1.1.5.3	Diagrama Ashrae	27
<b>2.2</b>	<b>TEORÍA DEL PROCESO DE SECADO</b>	<b>28</b>
2.2.1	Humead	28
2.2.1.1	Contenido de humead	29
2.2.1.2	Humedad de equilibrio	30
2.2.2	Balance de materia y energía	32
2.2.2.1	Balance de materia	32
2.2.2.2	Balance de energía	32
2.2.3	Velocidad y tiempo de secado	33
2.2.3.1	Velocidad de secado	33
2.2.3.2	Tiempo de secado	35
2.2.4	Eficiencia térmica del secado	35
<b>2.3</b>	<b>TÉCNICAS DE SECADO DE GRANOS</b>	<b>36</b>
2.3.1	Métodos de secado	36
2.3.1.1	Secado natural	36
2.3.1.1.1	Secado en la planta y en surcos	37
2.3.1.1.2	Secado en terrazas (asoleaderos)	37
2.3.1.2	Secado natural en secador rotativo	38
2.3.2	Secado de granos a bajas temperaturas	39
2.3.2.1	Principios de secado a bajas temperaturas	40
2.3.2.1.1	Contenido de humedad de equilibrio	40
2.3.2.1.2	Deterioro_	41
2.3.2.1.3	Proceso de secado en silos	41
2.3.2.1.4	Aumento del movimiento de aire o aumento de la temperatura del aire	42
2.3.2.1.5	flujo de aire mínimos	43
<b>2.4</b>	<b>SECADO SOLAR DE GRANOS</b>	<b>43</b>
2.4.1	Principios del secado solar	43
2.4.2	Clasificación de los secadores solares	44
2.4.2.1	Sistemas de secado solar pasivos	45
2.4.2.1.1	Secadores abiertos al sol	45
2.4.2.1.2	Secadores solares con circulación natural	45
2.4.2.1.2.1	Secador solar con circulación natural tipo distribuido	46
2.4.2.1.2.2	Secador solar con circulación natural tipo integral	47
2.4.2.1.2.2.1	Secador de gabinete solar pasivo	48
2.4.2.1.2.2.2	Secador solar con circulación natural tipo invernadero	49
2.4.2.1.2.3	Secador con circulación natural modo mixto	50

2.4.2.2	Sistema de secado solar activo	51
2.4.2.2.1	Secador solar activo tipo integral	52
2.4.2.2.2	Secador solar activo tipo distribuido	52
2.4.2.2.3	Secador solar activo tipo mixto	53
2.4.3	Captadores solares para calentamiento directo de aire	53
2.4.3.1	Tipos de captadores solares para calentamiento de aire	54
2.4.3.1.1	Colectores solares para calentamiento de aire con placa descubierta	54
2.4.3.1.2	Captadores solares para calentamiento de aire con cubierta	54
2.4.3.1.2.1	Tipos de calentadores de aire con cubierta	55
2.4.3.1.2.1.1	Captadores solares para calentamiento de aire con placa cubierta con paso de aire por arriba de la placa absorbadora	55
2.4.3.1.2.1.2	Captadores solares para calentamiento de aire de placa cubierta con paso atrás	55
2.4.3.1.2.1.3	Captadores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa suspendida	56
2.4.3.1.2.1.4	Captadores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa perforada	57

## CAPÍTULO III DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR COMBINADO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO PARA EL TRATAMIENTO DE ARROZ

3.1	INTRODUCCIÓN	59
3.1.1	Consideraciones de diseño	59
3.1.2	Descripción general	59
3.1.2.1	Modos de funcionamiento	60
3.1.2.1.1	funcionamiento diurno	60
3.1.2.1.1.1	Sistema de calentamiento solar indirecto de aire	60
3.1.2.1.2	Funcionamiento nocturno	60
3.1.2.1.3	Funcionamiento diurno y nocturno	61
3.1.2.1.3.1	Sistema de calentamiento solar directo de aire	61
3.1.2.2	Sistema solar fotovoltaico	61
3.1.2.3	Sistema de rehidratación de granos	61
3.2	BASES DE DISEÑO	62
3.2.1	Cálculos de la cantidad de energía para el secado del arroz	62
3.2.2	Cálculo del flujo de aire	63
3.2.3	Cálculo de la superficie de captadores solares	64
3.3	DISEÑO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS QUE CONSTITUYEN EL SECADOR SOLAR COMBINADO	65
3.3.1	Túnel de secado	65
3.3.1.1	Principio de funcionamiento	66
3.3.2	Circuito de calentamiento indirecto	67
3.3.2.1	Principio de funcionamiento	68

3.3.3	Circuito de calentamiento directo	70
3.3.3.1	Principio de funcionamiento	70
3.3.4	Sistema solar fotovoltaico	71
3.3.4.1	Requerimientos de energía eléctrica	71
3.3.4.2	Cálculo de la velocidad del aire	71
3.3.4.3	Cálculo de la demanda de energía eléctrica	73
3.3.4.4	Propuesta del dimensionamiento	73
3.3.4.4.1	Calentamiento directo durante el día	74
3.3.4.4.2	Calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico	74
3.3.4.4.3	Calentamiento directo durante el día y calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico durante la noche	74
3.3.4.5	Cálculo del número de módulos fotovoltaicos	74
3.3.4.5.1	Para el caso del tipo de funcionamiento diurno	74
3.3.4.5.2	Para el caso del calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico	75
3.3.4.5.3	Para el caso del calentamiento directo durante el día y calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico durante la noche	75
3.3.4.6	Cálculo del número de baterías	75
3.3.4.7	Descripción del sistema fotovoltaico	76
3.3.4.7.1	Principio de funcionamiento	76
3.3.5	Sistema de rehidratación de los granos de arroz	76
3.3.6	Sistema de medición y control de parámetros de operación	77

## CAPÍTULO IV ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.1	INTRODUCCIÓN	79
4.2	ESTUDIOS EXPERIMENTALES PREVIOS	79
4.2.1	Análisis de la cinética de secado de arroz con cascarilla (palay) de la variedad Morelos.	80
4.2.2	Estudio experimental de un dispositivo de laboratorio para la determinación de las condiciones óptimas del proceso de secado de granos alimenticios: caso particular, el arroz palay	82
4.2.2.1	Introducción	82
4.2.2.2	Resultados experimentales	83
4.2.3	Evaluación experimental e integración de un sistema fotovoltaico para la operación de un sistema solar termohidrónico para el secado de granos.	85
4.2.3.1	Introducción	85
4.2.3.2	Resultados experimentales	85
4.2.3.2.1	Integración del moto-ventilador a los módulos	87
4.2.3.2.2	Acoplamiento del moto-ventilador al túnel de secado	88

<b>4.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR INDIRECTO DE AIRE PARA SU ACOPLAMIENTO A UN TÚNEL DE SECADO DE GRANOS.</b>	<b>90</b>
4.3.1 Descripción general.	90
4.3.2 Estudio experimental del comportamiento del túnel sin producto	93
4.3.2.1 Procedimiento general	93
4.3.3 Estudio experimental del comportamiento del túnel con producto	93
4.3.3.1 Procedimiento general.	93
<b>4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>94</b>
4.4.1 Acondicionamiento del túnel de secado con el sistema de calentamiento indirecto de aire	94
4.4.1.1 Consideraciones generales	94
4.4.1.2 Variación de la temperatura del agua	95
4.4.1.3 Variación de la temperatura, velocidad del aire y humedad relativa del aire al interior del túnel de secado	98
4.4.1.3.1 Variación de la velocidad del aire	98
4.4.1.3.2 Variación de la humedad relativa	101
4.4.1.3.3 Variación de la temperatura del aire	104
4.4.2 Pruebas preliminares de secado solar de arroz (palay) re-hidratado	107
4.4.2.1 Consideraciones generales	107
4.4.2.2 Resultados experimentales	108
4.4.2.2.1 Resultados experimentales del 5 de julio	108
4.4.2.2.2 Resultados experimentales del 10 de julio	113
4.4.2.2.2.1 Resultados primera etapa (10 de julio de 2007)	113
4.4.2.2.2.2 Resultados segunda etapa (11 de julio de 2007)	119
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>127</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO</b>	<b>132</b>



# LISTA DE FIGURAS

1.1 Porcentajes de energía alimentaria suministrada por el arroz en áreas seleccionadas (2004).	2
1.2 Cultivo de arroz a nivel nacional (1985-2005).	6
1.3 Cultivo de arroz en Morelos (1985-2005).	
1.4 Secador tipo cascada, instalado en la Arrocería de Morelos Sociedad Anónima (ARMOSA), ubicada en Puente de Ixtla Morelos.	15
1.5 Vista al interior de la cámara de secado de un sistema de secado en depósito en reposo. Puente de Ixtla Morelos. (ARMOSA).	16
2.1 Psicrómetro.	25
2.2 Esquema del diagrama de Carrier.	26
2.3 Esquema del diagrama de Mollier.	27
2.4 Esquema del diagrama ASHRAE.	28
2.5 Curvas de equilibrio para diversas sustancias.	31
2.6 Curva de secado.	32
2.7 Plano del secador rotativo.	38
2.8 Secciones con distintos contenidos de humedad durante el secado de granos a bajas temperaturas dentro de un silo.	42
2.9 Secadores solares.	44
2.10 Características de un típico secador solar con circulación natural (indirecto) tipo distribuido.	47
2.11 Características de un típico secador solar con circulación natural tipo integral.	48
2.12 Secador solar pasivo de gabinete con circulación natural.	49
2.13 Características de un típico secador solar de modo mixto con circulación natural.	50
2.14 Secador solar mixto con circulación natural para arroz.	51
2.15 Secador tipo invernadero con convección forzada.	52
2.16 Características de un típico secador solar tipo distribuido.	52
2.17 Características de un secador solar tipo mixto.	53
2.18 Colector solar para calentamiento de aire con placa descubierta.	54
2.19 Colector solar para calentamiento de aire de paso frontal.	55
2.20 Colector solar para calentamiento de aire con paso atrás.	56
2.21 Colectores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa suspendida: (a) Paso paralelo; (b) Doble paso.	56
3.1 Vistas lateral y en isométrico del túnel de secado con las charolas.	65
3.2 Fotografía del túnel de secado ya instalado.	66
3.3 Diagrama del circuito hidráulico con circulación forzada.	67
3.4 Circulación entre los captadores solares y el intercambiador de calor.	68
3.5 Circulación entre los captadores solares y el tanque de almacenamiento.	69
3.6 Arreglo de calentadores solares de aire.	70
3.7 Dimensiones del difusor (cm).	72
3.8 Esquema eléctrico del sistema de solar fotovoltaico	76
3.9 Diagrama general del sistema de calentamiento solar y su integración al túnel de secado.	77

4.1 Deshidratación del arroz a 40 °C.	81
4.2 Deshidratación del arroz a 50 °C.	81
4.3 Deshidratación del arroz a 60 °C.	82
4.4 Equipo experimental para la determinación de las propiedades optimas de secado de granos.	83
4.5 Pérdida de peso de una cama de arroz de 6 cm bajo las condiciones controladas de la cámara de secado experimental de laboratorio.	84
4.6 Curvas de corriente consumida por el moto-ventilador y velocidad del aire a la salida del ventilador, en función del voltaje.	86
4.7 Curva característica del moto-ventilador y los módulos fotovoltaicos y la velocidad del aire a l salida del ventilador en función de la radiación solar.	87
4.8 Velocidad del aire a la salida del moto-ventilador alimentado con los módulos fotovoltaicos en función del tiempo.	88
4.9 Variación en el comportamiento de la radiación solar y de la velocidad del aire a la salida del moto-ventilador acoplado en el túnel, en función del tiempo.	89
4.10 Representación de la curva característica corriente-voltaje del moto-ventilador acoplado en el túnel de secado y la velocidad del aire obtenida a la entrada de mismo.	90
4.11 Diagrama de la colocación de los sensores de temperatura en el circuito hidráulico.	92
4.12 Programa de adquisición de datos HP-VEE.	92
4.13 Variación de la temperatura del agua a un flujo de 40 l/h en función de la radiación solar.	96
4.14 Variación de la temperatura del agua a un flujo de 50 l/h en función de la radiación solar.	97
4.15 Variación de la temperatura a un flujo de 60 l/h en función de la radiación solar.	98
4.16 Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 40 l/h.	99
4.17 Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar aun flujo de agua de 50 l/h.	100
4.18 Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 60 l/h.	101
4.19 Variación de la humedad relativa al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 40 l/h.	102
4.20 Variación de la humedad relativa al interior de túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 50 l/h.	103
4.21 Variación de la humedad relativa al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 60 l/h.	104
4.22 Distribución de la charolas dentro del túnel de secado.	104
4.23 Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo establecido de 40 l/h.	105
4.24 Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo establecido de 50 l/h.	106
4.25 Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo de agua de 60 l/h.	107
4.26 Variaciones de la irradiancia solar (5 de julio).	108
4.27 Variaciones de la temperatura dela agua en el campo de captadores y en el intercambiador de calor (5 de julio).	109

4.28 Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel de secado y de la radiación solar (5 de julio).	110
4.29 Variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado (5 de julio).	111
4.30 Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones (5 de julio).	112
4.31 Variaciones de la humedad en el grano (5 de julio).	113
4.32 Variaciones de la radiación solar a lo largo del día (10 de julio).	114
4.33 Variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor (10 de julio).	115
4.34 Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la radiación solar (10 de julio).	116
4.35 Variaciones de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado (10 de julio).	117
4.36 Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones (10 de julio).	118
4.37 Variaciones de la humedad en el grano (10 de julio).	119
4.38 Evolución de la radiación solar (11 de julio).	120
4.39 Variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor (11 de julio).	121
4.40 Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel de secado y de la irradiancia solar (11 de julio).	122
4.41 Variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel (11 de julio).	123
4.42 Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las diferentes secciones (11 de julio).	124
4.43 Variaciones en el contenido de humedad en el grano (11 julio).	125

# LISTA DE TABLAS

1.1 Mayores productores de arroz, 2003	3
1.2 Composición química de los arroces (porcentaje).	4
1.3 Contenido en vitaminas y minerales de los arroces (mg/100 gramos).	4
1.4 Comportamiento del cultivo de arroz a nivel nacional en el periodo 1985-2005.	5
1.5 Participación por regiones en la producción de arroz en la república mexicana en el año 2005.	7
1.6 Comportamiento del cultivo de arroz en el estado de Morelos, durante el periodo de 1985-2005.	7
1.7 Contenido de humedad en % al momento de la cosecha en las variedades de arroz Morelos A-70 y Morelos A-92.	10
1.8 Especificaciones para el secado de algunos alimentos.	12
2.1 Composición del aire seco.	22
2.2 Relación entre los valores de humedad en base húmeda y la humedad en base seca.	30
3.1 Resultados experimentales de las condiciones de trabajo para el secado de arroz.	71
3.2 Consumos por día de los componentes eléctricos del túnel de secado de granos.	73
4.1 Resumen de los resultados experimentales obtenidos en la cámara de secado del laboratorio.	84
4.2 Velocidades de deshidratación en grados de humedad por unidad de tiempo en los diferentes niveles (charolas) de cada una de las secciones del túnel de secado para diferentes días de prueba (5,10 y 11 de julio de 2007).	126

# PRESENTACIÓN

Los granos alimentarios, principalmente el trigo, el arroz y el maíz, constituyen el sustento básico del mundo, siendo necesario su conservación y almacenamiento. En la mayoría de los casos, se requiere de su secado para prolongar su tiempo de almacenaje y evitar el deterioro biológico y la posible germinación después de su cosecha.

El secado o deshidratación principalmente de los alimentos es uno de los métodos más antiguos para su conservación, pues se elimina la posibilidad de deterioro biológico. Esta técnica permite por un lado el autoabastecimiento y por otro dar un valor agregado al producto y mejorar el nivel económico tanto a nivel familiar como comunal, en especial énfasis en el sector rural, en donde no se disponen de métodos convencionales de conservación, tales como la refrigeración.

En la mayoría de los países en desarrollo no existe una infraestructura suficiente para el secado de la totalidad de la producción, por lo que se tiene que recurrir al escalonamiento de la cosecha y/o aumentar la velocidad de secado con la consecuencia de su posible deterioro.

La disminución de agua debe hacerse de modo que la calidad del producto no se vea afectada. En el diseño de equipos para secado se deben de considerar aquellos parámetros que influyen directamente en su capacidad, como son: la cantidad de producto a secar, las características de temperatura, humedad y velocidad del aire como fluido de intercambio térmico y; el tiempo necesario para el proceso; etc. En general la cinética de secado, esta influenciada por la velocidad y la temperatura del aire utilizado para la deshidratación.

En lo referente a la conservación y almacenamiento de granos, el arroz por su importancia en el consumo nacional, requiere en su procesamiento de una deshidratación, la cual se debe de llevar a cabo dentro de la 48 horas posteriores a su cosecha, antes del inicio de su germinación. Siendo el arroz un producto básico en la dieta nacional, y uno de los principales productos del Estado de Morelos, en donde se ha caracterizado por su excelente calidad. Sin embargo, la infraestructura de secado a nivel estatal no es suficiente, por lo que se tiene que escalonar la producción para poder deshidratar todo el arroz producido.

Las técnicas de secado utilizadas en la actualidad, en la mayoría de los casos, causan un deterioro muy importante, debido básicamente a las altas velocidades de secado, así como el maltrato físico del grano. Por otro lado, el costo de la energía para el proceso de deshidratación es considerable en el proceso de industrialización. En muchas situaciones el suministro de energía convencional es crítico, sobre todo en las regiones rurales.

Con base a lo anterior se propone el diseño de un sistema de secado de granos, en particular de arroz, el cual utiliza de forma combinada la energía solar, tanto en su conversión térmica como eléctrica. Este secador solar puede operar durante el día, a través de la circulación de agua que es calentada en un banco de

captadores solares y conducida a través de un intercambiador en donde de manera indirecta calienta el aire necesario para el acondicionamiento de la cámara de secado. Para la operación nocturna, el agua caliente, en lugar de circularse hacia el túnel de secado, se almacena para su posterior utilización en la noche. Para asegurar un funcionamiento diurno y nocturno, el sistema de secado solar cuenta con un subsistema de calentamiento directo de aire, el cual opera durante el día, al mismo tiempo que el sistema indirecto genera agua caliente para la operación nocturna.

Cabe mencionar que la energía eléctrica necesaria para la operación de los diferentes componentes eléctricos es suministrada por un sistema fotovoltaico, compuesto de módulos fotovoltaicos, baterías con controladores de carga y un sistema de distribución de la corriente eléctrica hacia los controles y los diferentes componentes, tales como bombas, moto-ventilador y las luminarias para la operación nocturna

En el presente trabajo de tesis, el objetivo principal es el diseñar, construir, instrumentar y evaluar experimentalmente el subsistema de calentamiento solar indirecto, para el acondicionamiento de la cámara de secado y la deshidratación de arroz cáscara (palay).

La tesis esta dividida en cuatro capítulos:

En el capítulo I; Introducción, se analiza la importancia del arroz como cereal básico, las estadísticas, tanto a nivel internacional como nacional, la importancia de la participación del Estado de Morelos en la producción nacional, la importancia del proceso de deshidratación y con base a la problemática analizada, la justificación de la propuesta del diseño, construcción, instrumentación y evaluación experimental del secador solar combinado para el tratamiento de arroz.

En el capítulo II. Secado, se establecen las bases teóricas del proceso de secado, conceptos y los fundamentos de psicometría, la influencia de la velocidad y el tiempo de secado, los diferentes tipos de secadores, así como la utilización de la energía solar en el proceso de secado. En esta parte, se describe el principio de funcionamiento de los sistemas de calentamiento solar y su integración en los diferentes tipos de secadores.

En el capítulo III, se integra el concepto y la descripción y el modo de funcionamiento de cada uno de los subsistemas del secador solar combinado, así como las bases diseño, construcción e instrumentación del túnel de secado y la integración del sistema de calentamiento solar indirecto de aire.

En el capítulo IV, corresponde al estudio experimental del sistema indirecto de calentamiento de aire y su integración para el acondicionamiento del túnel de secado. Se describen los antecedentes del estudio sobre la cinética de secado del arroz, así como del diseño, construcción, instrumentación y evaluación experimental del sistema fotovoltaico.

En este capítulo, se describe la rutina experimental así como los resultados experimentales sobre el comportamiento del sistema de calentamiento indirecto de aire, de su acondicionamiento en túnel de secado. Las experiencias se desarrollaron en una primera parte con el túnel de secado sin producto y después

se llevo a cabo la deshidratación solar de arroz palay, el cual fue previamente humidificado.

El trabajo se complementa con las conclusiones generales y las referencias bibliográficas y anexos en donde se describe de manera detallada el equipamiento utilizado durante el desarrollo de los diferentes estudios experimentales realizados.

## CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN



## 1.1 GENERALIDADES

### 1.1.1 El arroz en el mundo.

Los cereales en general suministran más de la mitad de las necesidades energéticas de la humanidad. El consumo cotidiano de 700-750 g de cereales suministra al hombre entre 2300 y 2500 calorías. El valor energético de los granos proviene esencialmente del almidón el cual representa el 70% de peso total. [1]

El arroz es el alimento básico predominante para 17 países de Asia y el Pacífico, nueve países de América del Norte y del Sur y ocho países de África. Este cereal proporciona el 20 % del suministro de energía alimentaria del mundo, en tanto que el trigo suministra el 19 % y el maíz, el 5 %. La Figura 1.1 explica el aporte que hace el arroz al suministro de energía alimentaria en diferentes regiones del mundo. [2]

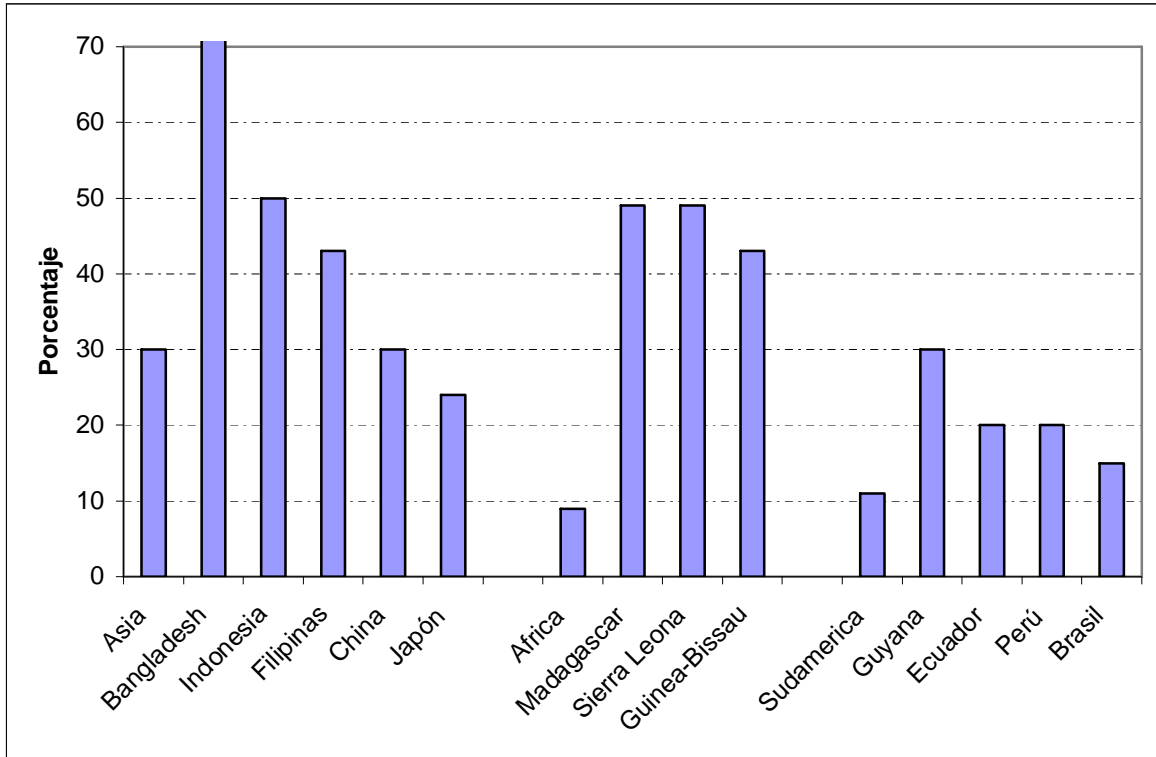


Figura 1.1 Porcentajes de energía alimentaria suministrada por el arroz en áreas seleccionadas (2004).

*El arroz es vida* para las mayores poblaciones del mundo y está profundamente relacionado con el patrimonio cultural de numerosas sociedades [2]. Es el alimento básico de más de la mitad de la población mundial. Sólo en Asia, más de 2,000 millones de personas obtienen del arroz y sus productos del 60 al 70 por ciento de su consumo calórico. Los sistemas de producción basados en el arroz y su correspondiente manipulación postcosecha dan empleo a casi

1,000 millones de personas de las zonas rurales de los países en vías de desarrollo. En estos países, aproximadamente las cuatro quintas partes del arroz mundial es cultivado por agricultores a pequeña escala. De lo cual se desprende la necesidad de que los sistemas de producción basados en el arroz sean altamente eficaces y productivos para lograr el desarrollo económico y una mejor calidad de vida para la mayor parte de la población mundial.

En Asia se sitúa aproximadamente el 90% de la producción mundial, el consumo de arroz se sitúa en 84 kg de arroz por persona, cifra muy superior comparada a los consumos en otros continentes de 3 a 25 kg. [1]

El arroz del género *Oryza*, esta adaptado a las condiciones desérticas, al calor, a la humedad, a las inundaciones, a la aridez y al frío, y se cultiva en suelos salinos, alcalinos y ácidos. De las 23 variedades de *Oryza* que existen, se cultivan dos; la *Oryza sativa*, originaria del trópico húmedo de Asia, y la *O glaberrima* de África Occidental.

En la Tabla 1.1 se muestran los mayores productores de arroz a nivel mundial en el año 2003.

<b>Tabla 1.1. Mayores productores de arroz, 2003 (arroz cáscara, MT)</b>	
1. China	166,000,000
2. India	133,513,000
3. Indonesia	51,849,200
4. Bangladesh	38,060,000
5. Vietnam	34,605,400
6. Tailandia	27,000,000
7. Myanmar	21,900,000
8. Filipinas	13,171,087
9. Brasil	10,219,300
10. Japón	9,863,000

Fuente: Pagina principal del Año Internacional del Arroz de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en ingles)

### **1.1.2 Valor nutricional**

En un grano de arroz cáscara (también llamado arroz paddy) se distingue la cáscara formada por tres capas (glumas, pálea y lema) y dentro de ella se encuentra el verdadero fruto o cariósido. El resultado de quitar la cáscara (descascarado) da origen al denominado arroz integral o pardo.

En el arroz integral el color oscuro se debe al pericarpio, en el que existen tres capas (cubierta seminal, nucela y aleurona). Mediante la molturación (abrasión) se puede eliminar este pericarpio que junto con el embrión constituye el salvado del arroz; tras separar el salvado se obtiene el arroz pulido o arroz blanco. En la operación del descascarado se separa entre un 18 y un 20 % del arroz paddy. En la obtención del arroz blanco la cantidad de salvado obtenida es

variable, dependiendo de la mayor o menor abrasión, pero suele oscilar entre el 10 y el 15% del arroz paddy. Es decir, el rendimiento en molino del arroz cáscara oscila entre el 65 y el 72%. En el arroz blanco, el almidón (contenido en el endospermo amiláceo) supone el 95% y las proteínas el 5% restante. La mayor parte de los lípidos (que estaban en el embrión) pasan al salvado.

En la tabla 1.2, se detalla la composición química (proteínas, lípidos, hidratos de carbono) del arroz cáscara y los productos que de él se obtienen. [3]

<b>Tabla 1.2. Composición química de los arroces (porcentaje)</b>					
<b>MODALIDAD DE ARROZ</b>	<b>PROTEÍNA BRUTA</b>	<b>LÍPIDOS BRUTOS</b>	<b>HIDRATOS DE CARBONO</b>	<b>FIBRA BRUTA</b>	<b>CENIZAS</b>
Cáscara	6-8	2	64-73	7-10	3-5
Integral	7-8	2-3	73-87	1	1
Elaborado	6-7	0.5	77-89	0.5	0.5
Salvado	11-15	15-20	34-62	7-11	7-10
Cascarilla	2-3	0.5	22-34	35-46	13-21

El contenido en vitaminas y minerales varía mucho de uno a otro tipo de arroz. En la tabla 1.3, se presentan algunos valores promedios.

<b>Tabla 1.3. Contenido en vitaminas y minerales de los arroces (mg/100 gramos)</b>		
<b>VITAMINAS Y MINERALES</b>	<b>ARROZ CARGO</b>	<b>ARROZ BLANCO</b>
Vitamina A	-	-
Tiamina (B <sub>1</sub> )	0.3	0.1
Riboflavina (B <sub>2</sub> )	0.1	0.05
Niacina (PP)	5.0	1.5
Piridoxina (B <sub>6</sub> )	0.6	0.3
Ácido pantoténico (B <sub>5</sub> )	1.2	0.5
Biotina	0.02	-
Ácido fólico	0.04	0.02
Vitamina B <sub>12</sub> *	0.05	0.02
Vitamina E	1.3	-
Calcio	23.0	21.0
Hierro	3.0	1.5
Magnesio	90.0	40.0
Fósforo	350.0	145.0
<b>* Microgramos/100 gramos</b>		

### 1.1.3. El arroz en México

El arroz junto con el maíz, el trigo y el frijol, son los alimentos básicos del pueblo de México estimándose un consumo per cápita de 6 kg. al año. Existen tres variedades de arroces que fundamentalmente se manejan en el mercado nacional, Sinaloa, Milagro Filipino y Morelos, siendo el primero el más barato en el mercado [1].

La producción de arroz en México, proviene principalmente de tres sistemas de cultivo; transplante bajo riego, que se da primordialmente en la zona Centro-Sur y establecida desde hace 160 años y cuya contribución a la producción nacional es de 19%; siembra directa bajo riego que abarca la zona Noroeste, Noreste y Occidente, cuyo inicio se dio a fines de la década de los años 40 con una participación del 46% de la producción nacional; de temporal que comprende la zona Sureste, sistema que comenzó a partir de 1973 con una participación en la producción del 35% del volumen nacional. [4]

Considerando sus volúmenes de producción de arroz en la presente década, cinco estados del país se han mantenido como los más importantes: Veracruz, Sinaloa, Campeche, Michoacán y Morelos, seguidos por Nayarit, Colima, Tabasco, Jalisco y Oaxaca. Los cinco primeros en conjunto han aportado alrededor del 75% de la producción total en el periodo 91-97. Los otros cinco cerca del 18% y el resto de la producción se obtiene, en menor escala, de Tamaulipas, Guerrero, Quintana Roo, Chiapas, México y Puebla, los que en suma sólo representan el 7% restante.

La producción de arroz en México ha sido insuficiente para satisfacer la demanda nacional en los últimos años, debido básicamente al abandono del campo y a la introducción de arroz de Tailandia, lo anterior ha obligado a la importación principalmente de E. U. En la tabla 1.4, se muestra como ha ido descendiendo la producción nacional de arroz en los últimos 20 años.

**Tabla 1.4. Comportamiento del cultivo de arroz a nivel nacional en el periodo 1985-2005**

<b>Año</b>	<b>Superficie Cosechada (Miles de Ha)</b>	<b>Producción (Miles de Toneladas)</b>	<b>Rendimiento (Ton/Ha)</b>
1985	216.50	807.53	3.7
1986	157.40	544.63	3.5
1987	154.80	590.99	3.8
1988	126.70	456.55	3.6
1889	151.40	527.12	3.5
1990	105.40	394.39	3.7
1991	84.89	347.24	4.1
1992	90.42	394.02	4.4
1993	58.94	287.18	4.9
1994	87.79	373.62	4.3
1995	78.40	367.00	4.7

1996	86.80	394.10	4.5
1997	113.00	469.50	4.2
1998	101.60	458.10	4.5
1999	79.70	326.50	4.1
2000	84.10	351.40	4.2
2001	53.20	226.60	4.3
2002	50.50	227.20	4.5
2003	60.00	273.30	4.6
2004	62.40	278.50	4.5
2005	42.00	239.90	5.7

Fuente: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)

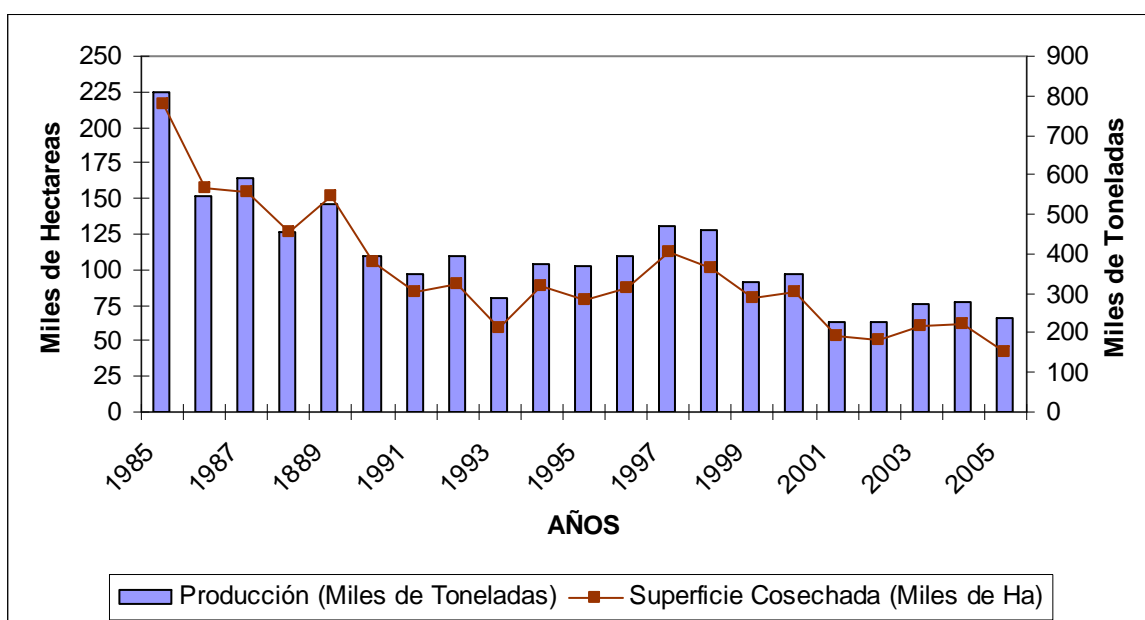


Figura 1.2. Cultivo de arroz a nivel nacional (1985-2005)

En el altiplano de México destaca el caso del Estado de Morelos, que a pesar de ser el quinto productor de arroz a nivel nacional, se considera como el productor de mayor rentabilidad, alcanzando una cifra record en el año 2005 de 10.24 toneladas por hectárea, además cuenta con la mejor calidad del país debido a que la variedad conocida con el nombre del mismo estado, Morelos, tiene las mejores características de tamaño, grosor, color, y dureza, con relación a las otras variedades que se producen en el país.

En las tablas 1.5 y 1.6 se muestra la participación del estado de Morelos dentro la producción nacional de arroz.

**Tabla 1.5. Participación por regiones en la producción de arroz en la república mexicana en el año 2005**

	<b>Superficie Cosechada (miles de Ha)</b>	<b>Producción (miles de toneladas)</b>	<b>Rendimiento (Ton/Ha)</b>
CHIAPAS	540	1,134.20	2.1
COLIMA	2,392.50	15,255.00	6.376
GUERRERO	182	560	3.077
JALISCO	1,346.00	8,324.84	6.185
MÉXICO	81	707	8.728
MICHOACÁN	60	180	3
MORELOS	1,287.10	12,889.50	10.014
NAYARIT	6,542.04	39,792.76	6.083
OAXACA	195	975	5
QUINTANA ROO	400	1,400.00	3.5
SINALOA	555	4,940.00	8.901
TABASCO	9,510.00	26,305.00	2.766
TAMAULIPAS	897	6,648.00	7.411
VERACRUZ	9,538.74	42,435.13	4.449
<b>TOTAL</b>	<b>33,526.38</b>	<b>161,546.43</b>	<b>4.818</b>
Región Centro	1,368.10	13,596.50	9.938
Región Centro Occidente	10,340.54	63,552.60	6.146
Región Noreste	897	6,648.00	7.411
Región Noroeste	555	4,940.00	8.901
Región Sureste	20,365.74	72,809.33	3.575

Fuente: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)

**Tabla. 1.6. Comportamiento del cultivo de arroz en el estado de Morelos, durante el periodo de 1985 – 2005.**

<b>Año</b>	<b>Superficie Cosechada (Miles de Ha)</b>	<b>Producción (Miles de Toneladas)</b>	<b>Rendimiento (Ton/Ha)</b>
1985	3.219	19.795	6.75
1986	3.792	23.658	6.24
1987	3.504	21.743	6.21
1988	3.790	23.285	6.14
1889	2.585	16.802	6.50
1990	3.570	26.986	7.56
1991	3.278	24.063	7.34
1992	2.873	22.182	7.72
1993	3.105	24.938	8.03

1994	2.534	20.159	7.86
1995	2.929	24.931	8.51
1996	3.776	29.885	7.91
1997	3.685	32.892	8.93
1998	3.618	35.662	9.86
1999	2.993	25.287	8.45
2000	3.647	36.144	9.91
2001	2.734	25.097	9.18
2002	2.332	22.158	9.50
2003	1.739	17.326	9.96
2004	1.287	12.889	10.01
2005	1.463	14.984	10.24

Fuente: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)

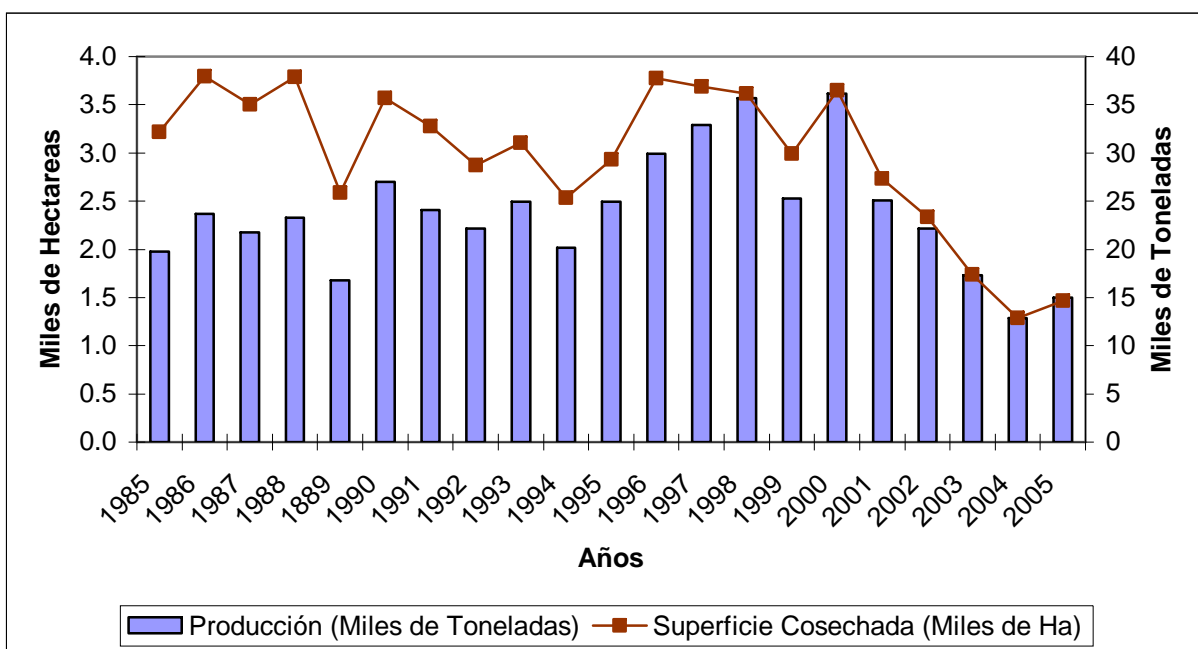


Figura 1.3 Cultivo de arroz en Morelos (1985-2005)

## 1.2 EL SECADO DE GRANOS

### 1.2.1 La importancia del secado

Al llegar a la madurez fisiológica, los productos agrícolas y en especial los granos, presentan en la mayoría de los casos, un contenido máximo de materia seca. Sería recomendable cosechar los granos en ese punto de desarrollo, desde el punto de vista del rendimiento máximo de la producción. No obstante, varios factores limitan esa posibilidad, destacándose entre ellos el contenido de humedad de los granos. En la mayoría de los granos este nivel de humedad está alrededor de 30%.

Los granos son cosechados con porcentajes de humedades elevados, que no permite el almacenamiento seguro, entonces se hace necesario el uso del secado. Entre todos los procesos que se aplican en la poscosecha, conservación y almacenamiento adecuado de granos, el secado es el que demanda mayor consumo energético. El secado de granos se puede definir como el método universal de adecuar los granos mediante la eliminación del agua hasta un nivel que prevenga el crecimiento de hongos y bacterias, de manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento, o su viabilidad como semilla. El nivel seguro de humedad para el almacenamiento de granos se encuentra entre el 10 y el 13%, base húmeda, para las principales variedades, dependiendo de las condiciones promedio de temperatura y humedad relativa del aire en América Latina. [7]

En América Latina no hay estudios concluyentes relativos a las pérdidas de granos posteriores a la cosecha. Se han hecho estimaciones, todas las cuales indican un mínimo de 20% [1]. Tomando esa cifra como base, el perjuicio anual para el Brasil, por ejemplo, es superior a mil millones de dólares. Se piensa que en los demás países de América Latina las pérdidas de granos posteriores a la cosecha también son elevadas. Lo dicho refleja indirectamente las precarias condiciones en que se realiza el tratamiento de la mayor parte de los granos producidos. El tratamiento de granos se compone de una serie de operaciones unitarias, entre las que destaca el secado. La falta de un proceso de secado adecuado, es una de las principales fuentes de pérdida de productos agrícolas.

Otra fuente importante de pérdidas son los hongos, sin embargo, se ha demostrado que la humedad relativa y temperaturas altas son los factores que favorecen el crecimiento de los hongos durante el almacenamiento de las semillas e inducen las pérdidas de viabilidad de las mismas durante el almacenamiento. Los hongos de almacén atacan a la semilla durante su transporte y almacenamiento; estos hongos requieren contenidos de humedad mínimos de 13.5 a 18.5% para su desarrollo.

En el caso particular del arroz el secado repercute en gran parte en el aprovechamiento de la cosecha debido a que si pasa demasiado tiempo en reposo (almacenado) tal y como se ha recolectado (arroz palay), la luz así como la humedad contenida en el grano provocan su germinación, razón por la cual es necesario someterlo al proceso de secado lo más pronto posible. Teniendo en consideración que el arroz requiere de procesos mecánicos para su comercialización y estas se realizan posteriores al proceso de secado, se detecta la gran importancia que tiene el secado en la industrialización y comercialización del arroz. Por lo tanto, el secado es importante para reducir las pérdidas de granos así como para aumentar su calidad.

La gran relevancia de la humedad en el manejo de los granos y semillas radica en que es el factor más importante en su conservación, un manejo inadecuado favorece el desarrollo de hongos e insectos, así como su efecto sobre procesos fisiológicos de las semillas, de los que depende la pérdida de vigor y viabilidad. Por otra parte, la humedad es importante en el comercio de los granos y semillas, ya que el comprador adquiere agua al mismo precio que la semilla, lo cual representa una fuerte pérdida económica; además el grano y la semilla húmedos ocupan más espacio que cuando están secos. El manejo de contenido



de humedad es básico para su conservación, pero este factor cobra mayor importancia cuando estamos hablando del arroz al momento de la cosecha ya que influye en su conservación. En la tabla 1.7, se muestran las distintas humedades contenidas en el arroz cosechado para dos diferentes variedades de arroz cultivadas en el estado de Morelos.

<b>Tabla 1.7. Contenido de humedad en % al momento de la cosecha en las variedades de arroz Morelos A-70 y Morelos A-92. (Gutiérrez Díaz L. J, 1992).</b>			
<b>VARIEDAD</b>	<b>CUAUTLA</b>	<b>JOJUTLA</b>	<b>P. IXTLA</b>
A-70	21.45	25.55	27.92
A-92	20.98	24.35	27.14

### **1.2.2 El secado de arroz.**

El secado es la fase más compleja en el proceso de postcosecha, ya que un método mal empleado provoca pérdidas en el descascarado, en el pulido o en el almacenamiento.

Se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para su almacenamiento [10].

Se entiende que es seguro su conservación y almacenamiento cuando se alcanza un nivel de humedad por debajo del cual se reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el ataque de insectos y hongos.

#### **1.2.2.1 Condiciones iniciales de secado.**

El arroz proveniente del campo, al llegar al lugar en donde será sometido al proceso de secado, es recibido por el encargado del lugar, el cual es responsable de comprobar su estado con respecto al contenido de humedad. Este por lo regular esta comprendido entre un 30 y 35% de humedad aproximadamente. Esta revisión es importante dado que con el conocimiento del contenido de humedad, el comprador del lote puede disminuir el pago debido a un posible exceso de humedad. Esto se considera tomando como referencia la diferencia del peso del arroz con determinada humedad y el exceso de la misma. Esta humedad inicial es muy variable ya que depende en gran parte de las condiciones en las que ha sido cosechado así como del tiempo de traslado entre el lugar donde es cosechado y el lugar donde sea secado.

#### **1.2.2.2 Proceso de secado.**

El proceso de secado se realiza en dos etapas, esto refiriéndose a los ciclos por los cuales es sometido el arroz al proceso de secado. [1]

a) Primera etapa de secado.

Al iniciar esta etapa el arroz proveniente del campo, contiene por lo general una humedad inicial de entre 30 a 35% aproximadamente, sin embargo, en el Estado de Morelos, el contenido de humedad es menor, siendo el más alto el de la región de Puente de Ixtla, de acuerdo a la tabla 1.7.

El arroz se somete a una limpieza general con la finalidad de eliminar ramas, hojas, hierbas, piedras, etc., esta actividad es independiente al tipo o sistema de secado que se empleará para la primera etapa. Al cabo de un determinado tiempo de haber sometido el arroz al proceso de secado, este deberá de reducir su humedad hasta un 18 o 19%, considerando terminada la primera etapa de secado.

Una vez concluida la primera etapa, es necesario dejar reposar al arroz, (receso), ya que no es recomendable pasar de una manera inmediata a la segunda etapa de secado, debido a la deshidratación rápida del arroz, provocando una cristalización anormal, lo cual repercute en los procesos posteriores al secado (descascarado, pulido, clasificado, etc.) y como consecuencia un bajo rendimiento en cuanto a la producción en el envasado.

Dicho receso tiene un tiempo de duración de 5 a 10 días, que por lo general se extiende hasta 20 o 25 días. Se da prioridad al arroz que recién ingresa a las instalaciones donde será secado, ya que como se ha comentado tiende a germinar y es necesario secarlo lo más pronto posible. Se ha observado y comprobado una mejor calidad en el arroz, que aquel que no tuvo un receso adecuado entre primera y segunda etapa de secado.

b) Segunda etapa de secado.

Después del receso el arroz se retoma, conteniendo en ese momento una humedad de 17 a 19% aproximadamente. El arroz se somete por una segunda ocasión a un proceso de secado hasta que el arroz contenga una humedad final entre un 13% y 14%, siendo el dominio más adecuado para su almacenamiento.

En la tabla 1.8, se muestran las temperaturas máximas de secado y los pretratamientos recomendados para algunos productos, entre algún otro el del arroz.

**Tabla 1.8. Especificaciones para el secado de algunos alimentos  
(Fink Pastrana A, 2000).**

<b>Producto</b>	<b>Temperatura máxima. °C</b>	<b>Pretratamiento</b>
Arroz	50	Ninguno
Maíz	50	Ninguno
Trigo	45	Ninguno
Arvejas verdes	65	Anqueado
Coliflor	65	Cortado en rodajas
Zanahoria	75	Cortado en rodajas y blanqueado
Cebolla	55	Cortado
Manzana	70	Cortado en rodajas y sulfurado en solución al 1-3% de ácido sulfuroso
Duraznos	65	Cortado en mitades y sulfurado
Plátano	70	Cortado en mitades longitudinales con cuchillo no ferroso

### **1.3. ESTUDIO DEL SECADO DE ARROZ EN EL ESTADO DE MORELOS.**

Con el propósito de conocer las diferentes tecnologías de secado aplicadas en el Estado de Morelos, se realizó un estudio en la región productora de Puente de Ixtla, en el Estado de Morelos, en la época de cosecha de arroz correspondiente al año de 1999, en las instalaciones de la industria ARMOSA. En el Estado de Morelos, los tipos de secado más empleados en las diferentes industrias procesadoras de arroz, son: en soleamiento en patio, en depósito en reposo (silos) y en cascada [1].

El arroz debe de secarse adecuadamente para contar con una humedad dentro de los límites establecidos, ya que de esto depende su comportamiento durante las siguientes etapas del proceso de envasado, tales como; descascarado, pulido, clasificado, etc. Esto repercute en los altos o bajos rendimientos de producción. A continuación se describen los diferentes tipos de secado.

#### **1.3.1. Tipos de Secado**

##### **1.3.1.1 Secado en patio, (asoleamiento).**

Para realizar el secado de arroz por asoleamiento en patio, es necesario contar con una amplia área para poder extenderlo. Este proceso consiste en la exposición del arroz a los rayos solares durante un tiempo determinado, según lo requiera, dependiendo del contenido de humedad. Para lograrlo es necesario traspalearlo manualmente durante lapsos de tiempo continuos, hasta obtener la humedad requerida.

La capacidad de trabajo de un patio es de aproximadamente 60 bultos con un peso aproximado de 85 kilogramos, siendo el equivalente a 5.1 toneladas. Se

requiere de un área de patio para el asoleamiento de aproximadamente 1200 m<sup>2</sup>, correspondiendo en este caso a una capacidad de 4.25 kg/m<sup>2</sup>.

La humedad inicial del arroz verde es de 33.5%, esta humedad es variable ya que depende de cómo entreguen el arroz al encargado del asoleadero, puesto que se somete al proceso de secado directamente de campo.

En cuanto a los operarios, sólo una persona se encarga de realizar los movimientos necesarios para el secado del arroz, de esta persona depende si quiere contratar uno o más ayudantes con cargo a su sueldo.

El tiempo del proceso de secado depende la humedad inicial contenida en el arroz de campo (verde) y de que tan intensa sea la radiación solar en el transcurso del día, ya que si existen nublados durante el proceso, el arroz tardaría más en secarse. El proceso inicia alrededor de las 6:00 a.m. y finaliza aproximadamente a las 5:00 p.m. del mismo día.

Inicialmente se tiende el arroz en el área (patio) asignada para el secado, se procura que el sol ya haya incrementado la temperatura en el patio, ya que si se extiende al estar húmedo o frío el proceso de secado tardaría más. Posteriormente se peina el arroz con un instrumento de madera (peine), creado por el trabajador a manera de pala dentada, esto con el fin de extraer del arroz las basuras grandes (paja, ramas, residuos de los sacos, etc.).

Esta actividad se realiza aproximadamente en un tiempo de 2 horas con 30 minutos, dejándolo asolear en reposo durante una hora. Posteriormente se traspalea haciendo líneas ó surcos a lo ancho del área de asoleado, esto con el fin de darle reposo al espacio entre los surcos de arroz ya que incrementara su temperatura. Se mantiene en reposo durante una hora aproximadamente después de esta operación. A continuación se le hace pasar un instrumento llamado rastrillo a todo el arroz para darle ventilación, dejándose asolear durante una hora aproximadamente. Posteriormente se hacen surcos en el arroz, ocupando el espacio vacío, ya que se le había dado reposo, por lo cual se tiene un incremento de temperatura la cual facilita el proceso de secado. Después se mantiene estático durante una hora aproximadamente. Posteriormente se peina el arroz extendiéndolo por toda el área para barrerlo, con el objeto de extraer las basuras más pequeñas que pudieran haber quedado, dejándolo reposar (asolear) durante 45 minutos.

A continuación se procede a rayar el arroz formando surcos, se deja asolear durante una hora, posteriormente se vuelve a rayar en sentido contrario, si fue de manera horizontal ahora se hará de manera vertical, esta operación se repite hasta que el arroz alcance la humedad final deseada.

Al registrarse la humedad deseada del arroz, se procede a levantarse, esto implica encostar y estibar el arroz en el área asignada. Esta actividad final toma un tiempo de aproximadamente dos horas. La humedad al finalizar el proceso es cercana al 20%.

Al día siguiente se repite el mismo procedimiento para un segundo paso de secado, se realizan los mismos movimientos en el arroz hasta lograr que la humedad descienda hasta un 12 %, sin embargo, en alguna de las ocasiones debido a la situación climatológica no se logra en una sesión, y es necesario otro día para completar el secado.

### **1.3.1.2. Secador tipo cascada.**

El secado por medio de un secador tipo cascada, consiste en cribar el arroz por medio de una máquina que recibe el nombre de zaranda, esto con el fin de retirar las impurezas propias de la cosecha del arroz; paja, hierba, polvo, etc. Posteriormente cae a la base de un elevador que por medio de cangilones traslada el arroz a un depósito que se encuentra en la parte superior de la torre de secado de la máquina. La máquina inicia su carga en la parte superior en donde el arroz por caída libre empieza a descender hasta la parte mas baja, llenando cascada por cascada de cada lado de la máquina para posteriormente llenar el deposito, una vez completa la carga se inicia el proceso de secado. Este consiste en hacer circular aire caliente de manera artificial por medio de un ventilador a una temperatura de 35 a 50°C al interior de la cámara donde se encuentran las cascadas en las cuales el arroz completa ciclos de descenso y elevación. El descenso es por caída libre y la elevación por medio de cangilones de un elevador como se muestra en la figura 1.2.

El secador utilizado tiene una capacidad nominal de 12 toneladas, sin embargo, durante la primera etapa de secado, la capacidad real de trabajo es de 120 bultos de arroz de campo (verde), cada bulto con un peso promedio de 80 kilogramos, por lo cual se da una cantidad de aproximadamente 9.6 toneladas. La humedad inicial del arroz fue de 25.6% y se requiere una mano de obra de un operador y de seis ayudantes.

Un proceso completo de la primera etapa, característico de secado consiste en un período de carga de cerca de 1.25 horas, el de secado de 2.30 horas, (con una humedad final de aproximadamente 18%) y el de descarga con una duración de 1.15 horas.

Para llegar a la segunda etapa del proceso de secado fue necesario haber sometido al arroz a la etapa previa en donde la humedad promedio del arroz antes de iniciar este segundo proceso se encuentra entre 16% y 19%, esta humedad es variable puesto que ha sido almacenado durante un periodo de tres a cinco días.

Como en la etapa anterior la capacidad real de trabajo es de aproximadamente 120 bultos de arroz de campo (verde), cada bulto con un peso promedio de 65 a 70 kilogramos, por lo cual se da una cantidad de aproximadamente 8.1 toneladas.

La humedad inicial del arroz; cerca de 18%, siendo la humedad final de 12% aproximadamente, que es la adecuada para continuar con las siguientes etapas de procesamiento del arroz.

Un proceso completo de la segunda etapa, característico de secado consiste en un período de carga de cerca de 1.63 horas, el de secado con un tiempo de 1.5 horas, (con una humedad final del 13%) y el de descarga con una duración de 0.93 horas.



Figura. 1.4. Secador tipo cascada, instalado en la Arrocería de Morelos Sociedad Anónima (ARMOSA), ubicada en Puente de Ixtla Morelos.

Este método tiene una gran capacidad y rapidez de secado, sin embargo, su desventaja es que se somete al arroz a cambios bruscos de temperatura y excesivos esfuerzos mecánicos. Esto repercute fuertemente en la estructura física del arroz, ya que debe contener una relativa rigidez para poder soportar los procesos posteriores al secado (descascarillado, clasificado, pulido envasado, etc.). Este sistema de secado disminuye en gran parte el rendimiento en cuanto a cantidad de granos enteros se refiere, pero es preferible a perder una gran cantidad de arroz, ya que si no es secado en el transcurso de los tres primeros días por la cantidad de humedad que contiene tiende a germinar o a mancharse por la creación de hongos.

El grano que ingresa a la secadora de cascada debe estar libre de impurezas y partículas extrañas las cuales se eliminan por medio de cribas. El arroz que se ingresa en el secador tiene por lo general un contenido de humedad entre 22 y 25% y como se ha mencionado con anterioridad, después del primer paso de secado (3 a 4 horas) el grano deberá reducirse la humedad aproximadamente entre un 18 y 19%. Es necesario que al arroz sea pasado por el mismo proceso (segundo paso), para que el arroz se considere como seco,

teniendo en cuenta que no es secado en su totalidad. En este momento el arroz desciende de una humedad de 19 a 13%, en un tiempo aproximado de 2 horas.

### **1.3.1.3. Secado en depósito en reposo, (silos).**

En el secado en depósitos de arroz en reposo (silos), el arroz no se mueve durante el proceso y se utiliza el mismo principio de inyección de aire caliente, a diferencia del secado por medio de cascada, en este caso el arroz se mantiene estático, por lo que no son considerables los esfuerzos a los que se le somete, ya que estos solo transcurren durante el proceso de llenado y vaciado de los silos. En este caso particular, los depósitos están compuestos por seis silos. Para el llenado de estos es necesario cribar el arroz por medio de una zaranda para posteriormente elevarlo y distribuirlo con un espiral transportador. Ya completa la carga establecida se procede a la operación de secado. Para su realización, el aire caliente o a temperatura ambiente, se distribuye por medio de un canal interior a cada uno de los silos.

Este tipo de secado se utiliza exclusivamente posterior al proceso de secado por asoleamiento en patio. En base a experiencias se sabe que con este secador no es posible secar arroz de campo (verde), puesto que la humedad es muy alta y por otro lado se tiene una gruesa capa de arroz contenida. Además el silo no permite el secado del arroz de campo ya que este se mantiene estático y la temperatura de secado es relativamente baja (a diferencia del secado de tipo cascada). En cuanto a la capacidad real de trabajo; un depósito contiene seis silos con una capacidad de 212 bultos pesando cada uno de ellos 75 kg aproximadamente, es decir 15.9 toneladas por silo. La figura 1.3, muestra el interior de un depósito para secado estático en silo.



Figura. 1.5. Vista al interior de la cámara de secado de un sistema de secado en depósito en reposo (compuertas de vaciado).Puente de Ixtla Morelos (ARMOSA).

La humedad del arroz al iniciar este proceso de secado es de 17% a 19%, ya que previamente fue sometido a un primer paso de secado mediante asoleamiento en patio. La humedad al término del proceso es de alrededor de 12%.

Un proceso completo característico de este tipo de secado consiste en un período de carga de cerca de 0.60 horas, el de secado con un tiempo de 46 horas, (con una humedad final del 13%) y el de descarga no se tiene establecido.

#### **1.4. Problemática del secado de arroz**

De los problemas nacionales, el de la alimentación es el de primera prioridad. Un eslabón de la cadena productora de alimentos que tiene una gran importancia es la necesidad de secar el grano para poderse almacenar sin peligro de daños, hasta que se necesite para su consumo.

Las deficiencias en el proceso de secado y almacenamiento de granos cuestan al país fortunas incalculables debido a que los granos, como el maíz, el arroz, el frijol, el trigo y el sorgo, se dañan a causa de que no se secaron adecuadamente y al almacenarlos en estas condiciones son, entre otras cosas, atacados por hongos, insectos y otras plagas, este problema justifica cualquier esfuerzo por minimizar tan enormes desperdicios.

En México disponemos de varias técnicas, algunas efectivas, económicas y de fácil implementación, para el secado de granos, como la de esparcirlos sobre superficies de cemento para secarlos por asoleamiento, o la de almacenarlos en trojes más o menos ventilados que por procesos de convección natural secan el grano eventualmente. Sin embargo, en lo general estas técnicas son poco eficientes en climas húmedos o en lugares en donde la cosecha coincide con la época de lluvias, en donde la productividad es mayor, siendo indispensable desarrollar sistemas de almacenamiento y secado más tecnificados pero más eficaces si se quiere disminuir las pérdidas debido a procesos ineficientes.

Como se ha mencionado, el arroz de Morelos está reconocido como uno de los mejores del mundo, por los rendimientos que se obtienen en el campo (más de 8 ton/ha), por el aspecto del grano y por su excelente calidad culinaria. Anualmente el estado produce alrededor de 25,000 toneladas, que son procesadas básicamente en cuatro molinos, (así llamadas a las industrias que procesan el arroz), ubicados en varios municipios del Estado de Morelos, principalmente en: Jojutla, Cuautla y Puente de Ixtla los cuales logran subsistir satisfactoriamente con los recursos generados, sin embargo, los grupos de productores mencionan que no en todos los casos se paga un precio justo por el arroz, ya que al momento de entregar el arroz palay al molino, se les aplican descuentos por diversos conceptos que afectan considerablemente el precio del producto para el productor, y por el otro lado el contenido de humedad es importante ya que si el grano no se seca con oportunidad, a partir del segundo día comienza la germinación prematura así como infección por hongos. Los industriales argumentan y se quejan de que la calidad del palay es diferente en cada campo productor y por esto hay factores que afectan la calidad. De aquí que



al llegar al molino se tengan que realizar más operaciones de beneficio, generando más gastos por la limpieza y por el secado, ya que el grano viene mucho más húmedo de lo normal.

Debido a la poca disponibilidad de infraestructura para el secado del arroz, se tienen que programar las producciones en el campo en forma escalonada, para poder secar todo el producto. En el caso del secado en cascada, la recuperación de granos enteros es baja, debido en ocasiones por el excedente en temperatura y en otras por el maltrato físico que sufre el grano al caer a lo largo de la torre de secado.

El factor de consumo de energía es también a considerar, ya que en el secado tecnificado, se consume por lo general el gas combustible, y en menor proporción combustibles líquidos. En el caso del uso del gas, tanto natural como licuado, el precio sube mes a mes, además hay que considerar el problema de contaminación ambiental debido a la alta emisión de CO<sub>2</sub>. En algunos centros productores, no es fácil disponer de combustibles, dificultando su transportación y almacenamiento.

### **1.5. Justificación y propuesta del estudio**

Con base a los datos mostrados, se propone la utilización de una tecnología de secado, que pueda contribuir a apoyar la infraestructura en el campo, sobre todo de pequeños y medianos productores, para poder presecar o secar el arroz palay disminuyendo en parte el problema del escalonamiento en la producción y dependiendo menos de los grandes centros procesadores. Por otro lado este sistema de secado deberá ser eficiente en cuanto al porcentaje de recuperación de granos enteros.

Los granos limpios y adecuadamente secos pueden permanecer almacenados por largos períodos, libres de la acción de insectos y roedores, trayendo beneficios como mayor valor agregado al producto en la hora de la entrega, comercialización en las épocas más oportunas y, consecuentemente, mayor competitividad.

Deberá ser utilizado en zonas rurales aisladas, que no cuentan con servicio eléctrico o este sea deficiente y el suministro de combustibles convencionales sea difícil o costoso ya que puede operar de manera autónoma o con un mínimo de energía auxiliar convencional o utilizar recursos energéticos locales, principalmente desperdicios agrícolas, obteniéndose una economía de energía, de combustible y mano de obra que son características predominantes en el proceso de secado.

Esta tecnología no debe estar exclusivamente diseñada para el secado de granos, sino debe ser lo suficientemente versátil para poder ser utilizada prácticamente durante todo el año, secando otros tipos de productos, que se cultiven localmente. Naturalmente, lo anterior, con base a estudios de cinética de secado específicos para cada tipo de producto.

Con base a las consideraciones anteriores, se propone el desarrollo de una tecnología de secado de productos alimentarios en particular de arroz, que cumpla con la mayoría de las condiciones anteriores. Por lo tanto se propone como objetivo de trabajo en este estudio, el diseño, construcción, instrumentación, y

evaluación experimental de un prototipo de deshidratador solar, autónomo que combine tanto la conversión térmica como eléctrica de la energía solar y que pueda operar de día o de noche, (sistema solar de calentamiento indirecto de aire) o de día y noche, secado (sistema de calentamiento solar indirecto y directo de aire) utilizando preferentemente esta energía renovable.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

El objetivo general de este estudio es: diseñar, construir, instrumentar y evaluar experimentalmente un sistema de calentamiento solar indirecto de aire e integrarlo en un sistema de secado solar combinado (termohidrónico-fotovoltaico) para el tratamiento de granos, en particular de arroz.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

Se proponen como objetivos específicos los siguientes:

- a) Creación de infraestructura experimental a nivel laboratorio para la determinación de la cinética de secado de productos alimentarios.
- b) Integración, instrumentación y evaluación experimental de un sistema de calentamiento solar de agua, con almacenamiento térmico, para el calentamiento indirecto de aire en un túnel de secado.
- c) Construcción, instrumentación y evaluación experimental de un túnel de secado para el tratamiento de arroz.
- d) Integración de un sistema solar fotovoltaico para la operación de los diferentes componentes eléctricos.
- e) Integración del sistema de calentamiento solar indirecto de aire al túnel de secado.
- f) Estudio experimental del comportamiento del túnel de secado operando con el sistema de calentamiento solar indirecto de aire, con y sin producto a tratar.

## CAPÍTULO II

# SECADO DE GRANOS

## **2.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO**

### **2.1.1 PSICROMETRÍA**

#### **2.1.1.1 Introducción**

La psicrometría se define como "aquella rama de la física relacionada con la medición o determinación de las condiciones del aire atmosférico, particularmente respecto de la mezcla de aire seco y vapor de agua", o bien "aquella parte de la ciencia que está en cierta forma íntimamente ligada a las propiedades termodinámicas del aire húmedo". Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de postcosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

En la conservación y almacenamiento de productos agrícolas se emplean diversas aplicaciones de la psicrometría, tales como el secado. En el secado a bajas temperaturas en particular, la velocidad de secado depende de la capacidad del aire para evaporar la humedad (potencial de secado), la cual es determinada por las condiciones psicrométricas del aire: temperatura y humedad relativa.

En el secado y almacenamiento, uno de los conceptos más importantes es el contenido de humedad de equilibrio. Así se denomina al intercambio recíproco de humedad entre materiales higroscópicos, tales como los granos, y el aire que los rodea; la condición de intercambio recíproco de humedad indica el equilibrio que hay entre el aire y el material. Este equilibrio se establece cuando la presión de vapor que corresponde a la humedad del producto y es igual a la presión de vapor de la humedad presente en el aire, en condiciones fijas de temperatura. Por tanto, en los estudios de higroscopia, las propiedades termodinámicas del aire húmedo son de fundamental importancia.

#### **2.1.1.2 Aire atmosférico**

Por definición, existe aire seco cuando se ha extraído todo el vapor de agua y los contaminantes del aire atmosférico. La composición del aire seco es relativamente constante, si bien el tiempo, la ubicación geográfica y la altura determinan pequeñas variaciones en la cantidad de componentes. La composición porcentual, en volumen o número de moles por 100 moles de aire seco, aparece en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Composición del aire seco**

Sustancia	Fórmula	Masa molecular (kg kg-mol <sup>-1</sup> )	Porcentajes en volumen (moles/ 100 moles)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.016	78.08400
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.000	20.94900
Argón	Ar	39.948	0.934000
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.010	0.031400
Neón	Ne	20.183	0.001818
Helio	He	4.0026	0.000524
Metano	CH <sub>4</sub>	16.031	0.000200
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	64.064	0.000100
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2.0159	0.000050
Criptón	Kr	83.800	0.000200
Ozono	O <sub>3</sub>	48.000	0.000200
Xenón	Xe	131.300	0.000200

Fuente: ASHRAE, 1977

La masa molecular aparente del aire seco es de 28.9645 kg-mol y la del vapor de agua es de 18.1535 kg-mol, ambas en la escala del carbono 12 (ASHRAE, 1977). El aire seco, normalmente tiene vapor de agua asociado, lo que da origen al que se denomina aire húmedo, que es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor presente en la mezcla puede variar entre cero y un valor correspondiente al estado de saturación. Esto corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede soportar a una temperatura determinada.

### 2.1.1.3 Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Hay diversas propiedades termodinámicas fundamentales ligadas a las propiedades del aire húmedo [10]. Existen tres propiedades que se relacionan con la temperatura: a) temperatura de bulbo seco; b) temperatura de bulbo húmedo y c) temperatura del punto de rocío.

Algunas propiedades termodinámicas caracterizan la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo: a) presión de vapor; b) razón de humedad; c) humedad relativa; y d) grado de saturación.

Otras propiedades de fundamental importancia, relacionadas con el volumen ocupado por el aire y con la energía del aire, respectivamente, son: a) el volumen específico, y b) la entalpía.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas propiedades.

#### **2.1.1.3.1 Temperatura de bulbo seco (T)**

La temperatura de bulbo seco, es la temperatura del aire húmedo y con frecuencia se le denomina sólo temperatura del aire; es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

#### **2.1.1.3.2 Temperatura de punto de rocío ( $T_{pr}$ )**

La temperatura de punto de rocío, es la temperatura a la cual el aire húmedo no saturado se satura, es decir, cuando el vapor de agua comienza a condensarse, por un proceso de enfriamiento, mientras que la presión y la razón de humedad se mantienen constantes.

#### **2.1.1.3.3 Temperatura de bulbo húmedo ( $T^*$ )**

Es la temperatura que alcanza un termómetro cubierto con un paño húmedo que se expone a una corriente de aire sin saturar que fluye a velocidades cercanas a 5 m/s (también puede hacerse que sea el termómetro el que se mueva). Cuando el paño se expone al aire, parte del agua se evapora, consumiendo inicialmente calor latente del paño y produciendo un descenso de la temperatura del termómetro. A partir de dicho momento fluye calor desde el aire hacia el paño, permitiendo la evaporación de más agua. El proceso sigue hasta que se alcanza el equilibrio entre ambos flujos de calor.

#### **2.1.1.3.4 Presión de vapor ( $P_v$ )**

La presión de vapor, es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado ( $P_{vs}$ ).

#### **2.1.1.3.5 Razón de humedad (razón de mezcla) (X)**

La razón de humedad del aire, se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla.

#### **2.1.1.3.6 Humedad relativa ( $H_r$ )**

La humedad relativa del aire, se define como la razón entre la presión de vapor de agua en un momento dado ( $P_v$ ) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad ( $P_{vs}$ ), a la misma temperatura. La humedad relativa se puede expresar como decimal o como porcentaje.

#### **2.1.1.3.7 Grado de saturación ( $\mu$ )**

El grado de saturación, es la relación entre la razón de humedad real de la mezcla ( $W$ ) y la razón de humedad del aire en estado de saturación ( $W_s$ ), a igual temperatura y presión atmosférica.

#### **2.1.1.3.8 Entalpía (h)**

La entalpía de la mezcla de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia; dado que en ingeniería sólo las diferencias de entalpía tienen interés

práctico, el valor que se seleccione para la temperatura de referencia carece de importancia.

#### **2.1.1.3.9 Volumen específico (Ve)**

El volumen específico del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco. La masa específica del aire húmedo no es igual al recíproco de su volumen específico. La masa específica del aire húmedo es la relación entre la masa total de la mezcla y el volumen que ella ocupa.

#### **2.1.1.4 Aparatos psicrométricos.**

Una de las facetas más importantes de la psicrometría es, precisamente, la medida directa o indirecta de los índices de humedad.

Es necesario disponer de instrumentos de medida de la humedad que permitan una lectura cómoda y que proporcionen una exactitud suficiente. A continuación se presentan los distintos equipos utilizados para medir la humedad, clasificados según el método de medida utilizado.

<b>EQUIPO</b>	<b>MÉTODO</b>
<b>Psicrómetro y aspiropsicrómetro</b>	<b>Termodinámico</b>
<b>Higrómetro de cabello u otros materiales</b>	<b>Higroscópico</b>
<b>Higrómetro de punto de rocío</b>	<b>Condensación</b>
<b>Higrómetro de absorción química</b>	<b>Gravimetría</b>
<b>Higrómetro eléctrico</b>	<b>Variación de propiedades eléctricas</b>

Se describe solo el funcionamiento del psicrómetro por que es uno de los equipos más sencillos que se utiliza para la medición de las temperaturas de bulbo seco y húmedo, con las cuales es posible determinar las otras propiedades del aire húmedo. Actualmente existe una gran cantidad de dispositivos para medir de manera directa la humedad del aire, llamados higrómetros, que están disponibles en el comercio.

##### **2.1.1.4.1 Psicrómetro.**

El psicrómetro consta básicamente de dos termómetros, uno normal (seco) y otro con su bulbo permanentemente humedecido gracias a un paño o gasa mojados que lo recubre. El paño o gasa, en forma de mecha, recibe el agua de un pequeño depósito en el que está sumergido el otro extremo del mismo. Este depósito presenta sólo un orificio para dejar paso a la mecha evitando la evaporación.

Resulta conveniente que el termómetro esté ventilado, evitándose además los efectos de la radiación. Por ello, se suele utilizar un psicrómetro en forma de honda, como el mostrado en la figura 2.1, de manera que ambos termómetros giran mediante un movimiento manual.

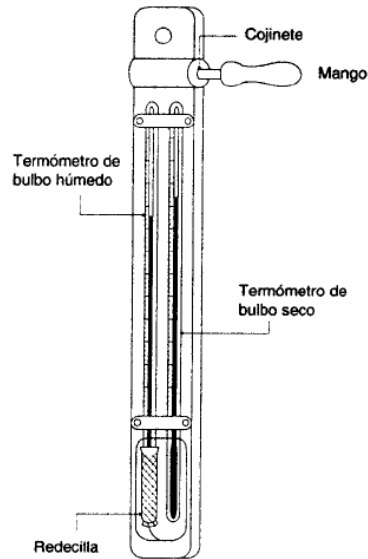


Figura 2.1. Psicrómetro [11]

### 2.1.1.5 Diagramas psicrométricos.

Las diferentes propiedades del aire húmedo están relacionadas entre sí, de forma que a partir de dos cualesquiera de las definidas anteriormente es posible obtener el resto. Sin embargo, el uso de las diversas ecuaciones o aproximaciones puede complicar excesivamente el cálculo de las propiedades. Por ello, se ha impuesto en la práctica la utilización de diagramas que se denominan diagramas psicrométricos. En estos diagramas, cada estado del aire vendrá representado por un punto, y cada proceso psicrométrico por una línea. Se consigue así una estimación rápida y precisa de la información necesaria en el estudio y diseño de equipos o procesos relacionados con la psicrometría. Además permiten realizar cálculos en cualquier momento y situación.

El principal inconveniente de los diagramas psicrométricos es que solamente pueden ser utilizados para la presión indicada (con un margen aproximado de un  $\pm 10\%$ , es decir, es necesario construir un diagrama para cada presión. Otro inconveniente es la gran cantidad de líneas que vienen representadas, lo cual puede llevar al usuario inexperto a cometer errores fácilmente. También hay que tener en cuenta que no están representadas las curvas para todos los valores posibles, por lo que en muchos casos será necesario interpolar. Finalmente, otro inconveniente es que hay, al menos, tres diagramas distintos según las principales coordenadas (ejes) que se eligen. Resulta necesario, por tanto, aprender a utilizar cualquiera de ellos. A continuación se muestran los principales diagramas psicrométricos: Carrier, Mollier y ASHRAE para la presión atmosférica (101.3 kPa), [10].



### 2.1.1.5.1 Diagrama Carrier.

En la figura 2.2 se representa un ejemplo del diagrama psicrométrico Carrier, en donde se puede observar lo siguiente:

- Representa la  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el eje de abscisas y la razón de mezcla o humedad ( $X$ , en kg de agua/kg de aire seco) en el eje de ordenadas.
- El volumen húmedo y las líneas de  $T_h$  constante o isoentálpicas se representan por oblicuas de distinta inclinación. En realidad las líneas de  $T_h$  constante son hipérbolas con una pequeña curvatura, por lo que parecen rectas.
- En el caso de la entalpía se obtiene únicamente el valor de la entalpía húmeda en la saturación, siendo entonces necesario incluir otras curvas que dan la desviación correspondiente.
- El calor específico húmedo no está representado, pero puede obtenerse fácilmente a partir de la ecuación psicrométrica para la entalpía húmeda, en algunos diagramas se incluye.

- 1 Curva de saturación
- 2 Humedad absoluta
- 3 Temperatura seca
- 4 Grado de saturación
- 5 Entalpía
- 6 Temperatura húmeda
- 7 Temperatura de rocío
- 8 Desviación de entalpía
- 9 Escala de entalpía

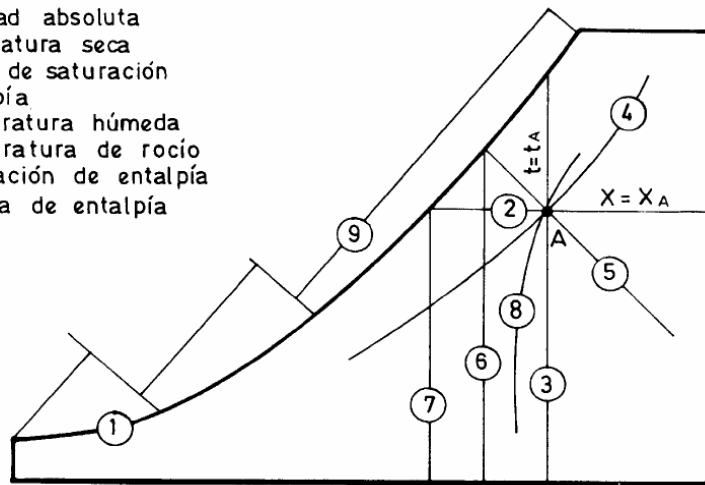


Figura 2.2. Esquema del diagrama de Carrier [11]

### 2.1.1.5.2 Diagrama Mollier.

En la figura 2.3 se representa un ejemplo del diagrama psicrométrico de Mollier, en donde se puede observar lo siguiente:

- Es el más antiguo de los diagramas psicrométricos, ya que fue propuesto por R. Mollier en 1932. Actualmente se utiliza, sobre todo, en Alemania y Francia.
- Representa la entalpía húmeda en el eje de ordenadas (a la izquierda) frente a la humedad  $X$  en abscisas. Las líneas de humedad constante son verticales, mientras que las isoentálpicas son rectas con pendiente negativa y paralelas entre sí.

- Las isothermas son líneas rectas que parten del eje de ordenadas. La isoterma correspondiente a 0 °C es horizontal, mientras que el resto de isothermas son líneas rectas con mayor pendiente a las temperaturas más altas.
- Las curvas de humedad relativa constante parten de abscisas próximas al origen y van creciendo y separándose en abanico. La curva más cercana al eje horizontal es la de saturación.
- Las líneas de volumen específico constante son rectas que parten del eje vertical, tienen pendiente negativa, aunque con menor inclinación que las isoentálpicas, y finalizan en la curva de saturación.

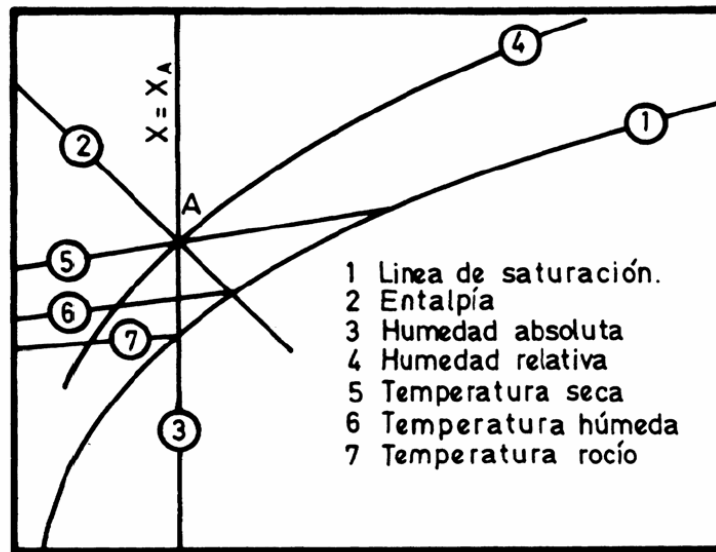


Figura 2.3. Esquema del diagrama Mollier [11]

### 2.1.1.5.3 Diagrama ASHRAE.

En la figura 2.4 se representa un ejemplo del diagrama psicrométrico ASHRAE, en donde se puede observar lo siguiente:

- Es el diagrama propuesto por la American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers (ASHRAE) y su empleo se está generalizando tanto en América como en Europa.
- Es muy similar al tipo Carrier, siendo la principal diferencia el que aquí se representa directamente la entalpía húmeda, en lugar de la entalpía de saturación. Además se elimina la aproximación de considerar exactamente iguales a las líneas isoentálpicas y las de temperatura de termómetro húmedo.

- 1 Línea de saturación
- 2 Zona de sobresaturación
- 3 Entalpia
- 4 Humedad absoluta
- 5 Grado de saturación
- 6 Temperatura seca
- 7 Temperatura de rocío
- 8 Línea de saturación adiabática
- 9 Temperatura húmeda
- 10 Volumen específico

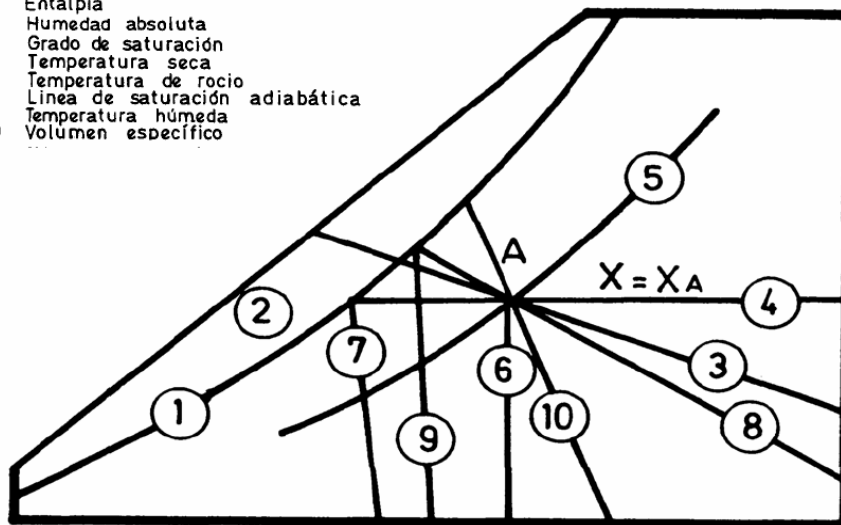


Figura 2.4. Esquema del diagrama ASHRAE [11]

## 2.2 TEORÍA DEL PROCESO DE SECADO

### 2.2.1 HUMEDAD

En el proceso de secado se requiere calor para evaporar la humedad del grano y un flujo de aire para que se lleve la humedad evaporada. Hay dos mecanismos implicados en el proceso de secado; la migración de humedad del interior del grano hacia la superficie, y la evaporación de la humedad de la superficie hacia al aire circundante. La velocidad de secado esta determinada por el contenido de humedad y la temperatura del grano, la humedad relativa y la velocidad del aire en contacto con el grano.

Los granos son higroscópicos, por lo tanto pierden o ganan humedad hasta que alcanzan el equilibrio con el ambiente circundante. Cuando el grano pierde humedad hacia sus alrededores, se dice que ha sido secado.

El intercambio de humedad entre el grano y el aire seco depende de sus presiones de vapor. La humedad se mueve de presiones de vapor altas a presiones de vapor bajas, entre mayor sea la diferencia de presiones de vapor entre el grano y del aire, más rápido será el intercambio de humedad. Por lo tanto, el diferencial de presión de vapor entre el grano y el aire seco es la fuerza que remueve la humedad [13].

Otro factor importante en el secado de una cierta profundidad de granos es mantener la misma diferencia de presión de vapor favorable para remover la humedad hasta que el aire deje la capa superior de la cama de granos. El aire caliente se mueve a través de la cama de granos, la humedad del aire se incrementa por que absorbe la humedad de las capas inferiores del grano, por lo

tanto su potencial para tomar la humedad de las capas superiores disminuye. Moviendo el aire rápidamente (alta velocidad de flujo) se compensará esta pérdida de diferencial de presión de vapor y alguna resequedad ocurrirá a través de la cama de grano. Por lo tanto, la velocidad de secado depende en gran parte de la velocidad a la cual el aire seco se pueda llevar la humedad que es evaporada.

### 2.2.1.1 Contenido de humedad.

El contenido de humedad se puede expresar tanto en base húmeda como en base seca. La humedad con base húmeda,  $H_{bh}$ , y la humedad con base seca,  $H_{bs}$ , se definen respectivamente con las ecuaciones 2.1 y 2.2: donde  $m_a$  es la masa del agua,  $m_s$  es la masa de la materia seca y  $m_t$  es la masa total [13].

$$H_{bh} = \frac{m_a}{m_a + m_s} = \frac{m_a}{m_t} \quad (2.1)$$

$$H_{bs} = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.2)$$

El contenido de humedad con base húmeda se puede expresar tanto en decimal como en porcentaje; en cambio, el contenido de humedad con base seca sólo tiene sentido si se expresa en decimal, puesto que se trata de una relación entre componentes del material. En el comercio y la industria se emplea mayormente el contenido de humedad con base húmeda, mientras que en trabajos de laboratorio el contenido de humedad con base seca resulta más adecuado. Resulta muy sencillo relacionar un contenido con el otro:

$$H_{bh} = \frac{H_{bs}}{H_{bs} + 1} \quad (2.3)$$

$$H_{bs} = \frac{H_{bh}}{1 - H_{bh}} \quad (2.4)$$

La tabla 2.2 representa la relación entre los valores de  $H_{bh}$  y los de  $H_{bs}$ . Se aprecia que estos prácticamente coinciden para bajos contenidos de humedad base húmeda.

Tabla 2.2. Relación entre los valores de humedad en base húmeda y la humedad en base seca (Finck Pastrana A, 2000).					
$H_{bh}$ %	$H_{bs}$	$H_{bh}$ %	$H_{bs}$	$H_{bh}$ %	$H_{bs}$
0	0.000	10	0.111	20	0.250
1	0.010	11	0.123	21	0.428
2	0.020	12	0.136	22	0.666
3	0.030	13	0.49	23	1.000
4	0.041	14	0.162	24	1.500
5	0.052	15	0.176	25	2.330
6	0.063	16	0.190	26	4.000
7	0.075	17	0.204	27	9.000
8	0.086	18	0.219	28	19.000
9	0.098	19	0.234	29	$\infty$

### 2.2.1.2 Humedad en equilibrio.

Cuando una sustancia se expone al aire (no saturado) comenzará a evaporarse o condensarse agua en él hasta que las presiones parciales del vapor contenido en el aire y del líquido contenido en el sólido se igualen. Entonces el sólido y el aire estarán en equilibrio, llamándose **humedad en equilibrio**,  $H_e$ , que se define como el contenido de agua en base seca que tiene el sólido en ese momento y condicionado a que no cambien las circunstancias externas (temperatura o humedad principalmente). Para una temperatura establecida, la humedad en equilibrio del sólido dependerá, por tanto, de la humedad relativa que tenga el aire. Al representar gráficamente  $H_R$  frente a  $H_e$  (o viceversa) se obtiene una curva de equilibrio, que será distinta para cada sustancia y para cada temperatura.

La figura 2.5, muestra algunos ejemplos de las curvas de equilibrio para diversas sustancias. Su interpretación es la siguiente, en el caso de la madera expuesta al aire con humedad del 60% (punto A), la curva de equilibrio nos indica que contendrá aproximadamente 115 g de agua/kg sólido seco. La máxima humedad de equilibrio se obtendrá para aire saturado (punto B), y será de 0.3 kg agua/kg sólido seco. Si queremos secar la madera hasta que contenga 0.05 kg agua/kg sólido seco (punto C), tendremos que exponerla a una corriente de aire que tenga una humedad relativa del 22.5 % aproximadamente. Una vez que se alcance el equilibrio sería imposible seguir secando la madera aunque mantuviésemos la corriente de aire durante más tiempo. Por otra parte, si después de seca, la madera entra en contacto con aire que tenga una humedad superior al 22.5 %, ésta volverá a recuperar parte del agua que ha perdido. Finalmente, hay que tener en cuenta que, aunque en principio, si se utiliza aire completamente seco se podría eliminar toda la humedad del sólido, en la práctica puede existir cierta cantidad de agua que se encuentre ligada dentro del material y que sea prácticamente difícil de evaporar.

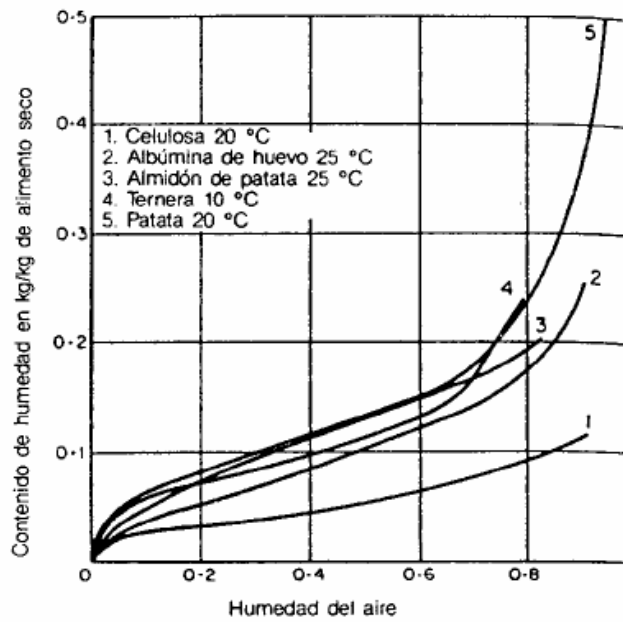
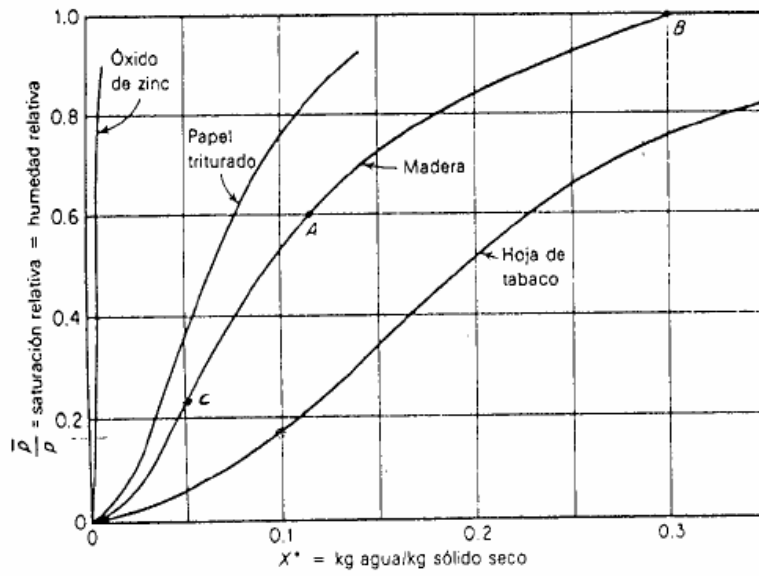


Figura 2.5. Curvas de equilibrio para diversas sustancias [4].

## 2.2.2 Balances de materia y energía.

### 2.2.2.1 Balance de materia.

En el proceso de secado se supone que toda el agua que sale del producto pasa al aire, entonces debe cumplir que: la disminución de agua en el producto es igual al aumento del agua en el aire:

$$m_{agua} = m_s \Delta H_{bs} = m_a \Delta X \quad (2.5)$$

Siendo  $m_{agua}$  la cantidad de agua,  $m_s$  la masa de producto seco,  $m_a$  la masa de aire seco,  $\Delta H_{bs}$  la humedad perdida por el producto en base seca y  $\Delta X$  la humedad ganada por cada kg de aire seco. En esta ecuación también pueden utilizarse caudales en lugar de masas.

### 2.2.2.2 Balance de energía.

Para establecer el balance de energía hay que establecer una serie de suposiciones:

- No existen pérdidas de energía y la temperatura del termómetro húmedo permanece constante durante el proceso de secado. Esto significa que la variación de entalpía específica será muy pequeña y positiva, pero no exactamente cero (como sería si el proceso fuese estrictamente isoentálpico).
- La mayor parte de la energía que aporta el aire se emplea en la evaporación del agua contenida en el sólido. Esto quiere decir, que se supone que el producto a secar se mantiene siempre, o al menos cuando la velocidad de secado es constante, a la temperatura del termómetro húmedo del aire,  $T_h$ .

En estas condiciones debe cumplirse el siguiente balance de energía:

$$m_a (\Delta h_2^* - \Delta h_1^*) \approx m_s \Delta H_{bs} c_{agua}(T_h) T_h \quad (2.6)$$

Donde  $(\Delta h_2^* - \Delta h_1^*)$  es la variación de entalpía específica que sufre el aire,  $m_s \Delta H_{bs}$  es el agua evaporada del sólido e incorporada al aire, y  $c_{agua}(T_h)$  es el calor específico del agua líquida a la temperatura del termómetro húmedo.

Estos cálculos se simplifican si se utiliza el diagrama psicrométrico, en donde el proceso de secado sigue la línea de  $T_h$  constante, siendo sencilla la operación de encontrar todos los términos del balance de energía una vez que se conoce el balance de masas. Así, si se utiliza el diagrama psicrométrico, y se obtiene el calor específico del agua, no es necesario resolver el sistema de ecuaciones, y el balance de energía se utiliza solamente para comprobar si se cumple (al menos aproximadamente) la suposición de que el sólido a secar no cambia su temperatura durante el secado y que ésta es precisamente  $T_h$ .

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, puede definirse un rendimiento térmico del proceso de secado,  $R_t$  como el cociente (en %) entre el calor necesario para la vaporización del agua contenida en el producto a una temperatura aproximadamente igual a la del termómetro húmedo, y la entalpía del aire al comienzo del proceso de secado.

$$R_T = \frac{m_w L_v (T_h)}{m_a \Delta h_1^*} \quad (2.7)$$

Este rendimiento nos indica que porcentaje de la energía inicial del aire se ha empleado en eliminar el agua, y suele situarse en un dominio entre un 40% y 60%.

### 2.2.3 Velocidad y tiempo de secado.

Aparte de los balances de materia y energía, otros parámetros involucrados en el secado son la velocidad a la que éste se produce y, dependiendo de ella, el tiempo que tardará en realizarse el proceso.

#### 2.2.3.1 Velocidad de secado.

La velocidad de secado es la cantidad de agua que se consigue eliminar por unidad de tiempo:

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_a \Delta X = \dot{m}_s \Delta H_{bs} \quad (2.8)$$

En muchas ocasiones esta velocidad es una velocidad específica,  $V$  referida a la unidad de masa de sólido seco ó referida a la superficie de producto,  $V_A$ .

$$V = \frac{\dot{m}_{agua}}{\dot{m}_s} = \frac{\Delta H_{bs}}{t} \quad \text{kg agua}/(\text{seg kg sólido seco}) \quad (2.9)$$

$$V_A = \frac{\dot{m}_{agua}}{A} = \dot{m}_s \frac{\Delta H_{bs}}{A} \quad \text{kg agua}/(\text{seg m}^2) \quad (2.10)$$

La velocidad de secado esta determinada por muchos factores, siendo el más importante la transferencia de calor por convección, entre el aire y el producto que se está secando. Si se conoce el coeficiente de convección,  $h$  ( $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ), es posible calcular la velocidad de secado suponiendo que el producto permanece a temperatura constante  $T_h$ , de acuerdo a la siguiente ecuación:



$$\dot{Q} = Q/t = h A \Delta T = \dot{m}_{\text{agua}} L_v (T_h) \quad (2.11)$$

donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre el aire que entra y el producto a secar.

La ecuación 2.12, es una forma sencilla para calcular la velocidad por unidad de área:

$$V_A = h \Delta T / L_v (T_h) \quad (2.12)$$

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso [11], es decir, que la eliminación de agua se realiza en una serie de etapas en las que la velocidad de secado es diferente. La representación gráfica de la velocidad de secado frente a la humedad del producto o frente al tiempo se denomina “curva de secado”, y son diferentes de acuerdo al tipo de producto a deshidratar.

En la figura 2.6, se representa un ejemplo de una curva de secado. El producto se encuentra inicialmente en el punto A. La etapa inicial de secado (AB) ocurre de acuerdo a las características del producto y el agua se van calentando lentamente. Posteriormente se produce una gran disminución del contenido de agua manteniéndose la velocidad constante (BC). Esta etapa finaliza cuando se alcanza la llamada humedad crítica  $H_c$ , fácilmente identificable en las curvas de secado por el cambio brusco de la misma. Finalmente la velocidad empieza a decrecer (CD), pudiendo existir uno o varios periodos de velocidad decreciente.

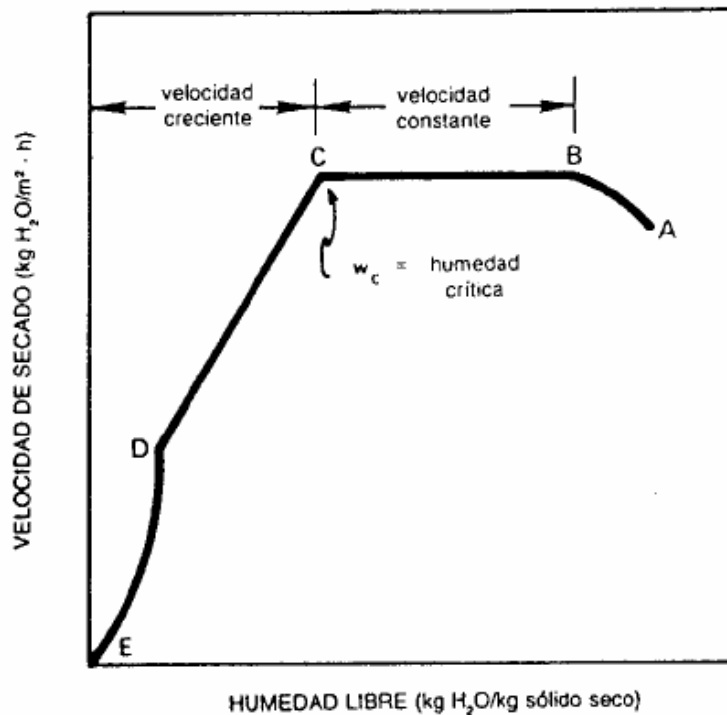


Figura 2.6 Curva de secado, [4].

Desde el punto de vista teórico, y con el fin de calcular el tiempo de secado, se considera únicamente los periodos de velocidad constante, donde la humedad en base seca disminuye desde  $H_0$  hasta  $H_c$ , y de velocidad constantemente decreciente, donde la humedad en base seca disminuye desde  $H_c$  hasta  $H_1$ .

### 2.2.3.2 Tiempo de secado.

Tiempo de secado para el período de velocidad constante.  
La ecuación 2.13, permite el cálculo del tiempo de secado durante el período de velocidad constante,  $V_c$  (por unidad de masa de sólido seco):

$$t_c = \frac{m_s (H_0 - H_c)}{\dot{m}_{agua}} = \frac{(H_0 - H_c)}{V_c} \quad (2.13)$$

La ecuación 2.14, permite el cálculo del tiempo de secado durante el período de velocidad decreciente,  $V_d$ :

$$t_d = (H_c/V_c) \ln(H_c/H_1) \quad (2.14)$$

Donde, en ambos casos, las humedades  $H$  están expresadas en base seca.

### 2.2.4 Eficiencia térmica del secado

El consumo de energía en un secador no se debe medir solamente en unidades de combustible usadas en el proceso. Es importante que se relacione este consumo con la cantidad correspondiente de agua evaporada, de ahí la necesidad de definir un elemento que sirva de término de comparación entre diferentes secadores. Ese término, bien aceptado ya entre la comunidad científica, es el que se denomina eficiencia térmica de secado y se define como la relación entre la cantidad de energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso.

El consumo de energía por unidad de agua evaporada varía con diversos parámetros. De ellos, los más importantes son: la variación de la humedad del producto durante el secado (tasa de secado), las condiciones ambientales y el tipo de secador empleado.

La velocidad de secado de cierto tipo de granos, a su vez, es función de la temperatura y del flujo de aire de secado, del contenido de humedad inicial y de equilibrio de los granos, de la temperatura y, cuando corresponda, de la velocidad de los granos dentro del secador.

El tipo de secador que se utilice ejerce gran influencia sobre el rendimiento térmico del secado. Cada producto se seca a una velocidad diferente y cada uno presenta exigencias más o menos precisas respecto a la calidad. Existe así la necesidad de perfeccionar diferentes secadores por tipo de grano, pues las condiciones de secado (temperatura, flujo de aire, velocidad del paso del producto

por el secador, contenido inicial de humedad, etc.) del arroz son distintas de las del maíz, frijol o soya.

## **2.3 TÉCNICAS DE SECADO DE GRANOS**

En los métodos de secado más modernos, los intercambios de aire y masa entre granos y ambiente se producen principalmente por convección de aire forzado. Por tal motivo, los secadores de granos están provistos generalmente, de un ventilador, como agente de movimiento del aire. La falta de energía eléctrica para impulsar estos ventiladores es una de las mayores trabas que impide la popularización del sistema de secado y almacenamiento en el lugar de producción. Ciertos países están enfocando sus esfuerzos, con el apoyo financiero del gobierno, en el desarrollo de métodos que hagan técnica y económicamente viable el tratamiento de granos en el propio campo, en regiones que no disponen de energía eléctrica.

### **2.3.1 Métodos de secado**

Los métodos que se emplean para realizar el secado de granos son diversos y se pueden clasificar en secado natural y artificial. El secado natural se da directamente en el campo o en asoleaderos y el artificial se lleva a cabo a bajas y altas temperaturas o una combinación de ambas.

#### **2.3.1.1 Secado natural**

Se entiende por secado natural aquel en que el movimiento del aire se realiza por acción de los vientos y en que la evaporación de la humedad se deriva del potencial de secado del aire y de la influencia directa de la energía solar. El secado natural, en terrazas o en el campo, es un método ampliamente utilizado. El proceso comienza poco tiempo después de la maduración fisiológica del producto. En este periodo inicial, el secado se efectúa en la misma planta y el hombre ejerce el control de la operación únicamente durante el lapso en que el producto permanece en el campo hasta el momento de la cosecha. Esta puede realizarse antes de que el producto alcance el grado de humedad ideal para el almacenamiento, en cuyo caso es preciso complementar el secado con algún otro procedimiento, que puede ser natural o artificial.

La pérdida de calidad que puede ocurrir cuando se recurre al secado natural en el campo se debe al ataque de insectos, pájaros y roedores, la contaminación por microorganismos, el desgrane, las fisuras y la ocurrencia de condiciones meteorológicas adversas.

El secado natural en el campo, además de realizarse en la planta, se puede efectuar también en surcos. Para abreviar el tiempo de secado y reducir al mínimo las pérdidas, se puede realizar el secado, por último, en terrazas o en secadores que aprovechan la acción de los vientos y la energía solar.

### **2.3.1.1.1 Secado en la planta y en surcos**

Poco después de su maduración fisiológica, los granos presentan, en general, un elevado contenido de humedad, lo que dificulta la cosecha y no permite el almacenamiento. Por tanto, el producto tiene que permanecer en el campo hasta que su contenido de humedad permita cosecharlo o llegue al grado ideal para almacenarlo.

El secado en la planta se puede combinar con otro sistema de secado. Si dicho sistema tiene alguna limitación respecto del contenido inicial de humedad, hay que comenzar la cosecha a partir de ese contenido. Es lo que ocurre cuando se aplica el secado artificial a baja temperatura. En los casos en que se utiliza el secado a temperatura elevada, las limitaciones relativas al contenido de humedad en la cosecha tienen que ver con la facilidad de ejecución de esta operación y con los fines del producto. En términos generales, se anticipa la cosecha al máximo, con el objeto de reducir las pérdidas y despejar el campo para otras actividades.

En la producción de arroz se persigue el máximo rendimiento de granos enteros en la operación de beneficio. Este rendimiento está vinculado a la variedad, el estado de maduración y el grado de humedad de la cosecha, los daños físicos producidos durante esta última, el manejo, transporte, tratamiento y almacenamiento de los granos. El punto de rendimiento máximo de granos enteros ocurre un poco antes del punto de producción máxima de materia seca. Lo dicho significa que cuanto más larga sea la permanencia del producto en el campo, para el secado natural en la planta, menor será el rendimiento de granos enteros. Se explica este hecho, por la mayor susceptibilidad del producto a partirse o agrietarse debido a las variaciones de temperatura y de humedad relativa del aire, en el día y en la noche, cuando el contenido de humedad ha bajado.

### **2.3.1.1.2 Secado en terrazas (asoleaderos)**

El secado en terrazas es un procedimiento de secado natural en el cual el producto se esparce sobre un piso de concreto, o incluso de tierra apisonada, en una capa, generalmente de menos de 0.10 m. de espesor [13]. El intercambio de energía y de humedad, entre el aire y el producto, queda limitado casi exclusivamente a la superficie de la capa de producto, por lo que es necesario revolver el grano periódicamente. El movimiento del aire derivado del viento acarrea la humedad que el producto pierde, a la capa de aire situada inmediatamente encima de él. La temperatura y la humedad relativa del aire ambiente son factores fundamentales en la velocidad de secado del producto, pues el aire posee una capacidad máxima para evaporar humedad. Una parte de la energía solar se absorbe y produce el calentamiento de los granos, lo que ayuda a acelerar el movimiento de la humedad, desde el interior hacia la superficie de los granos y facilita, por tanto, el secado.

El uso de terrazas o asoleaderos para el secado de productos agrícolas en general está muy extendido, por la sencillez de su construcción y funcionamiento, el bajo costo inicial y la versatilidad, puesto que la mayoría de los productos se

pueden secar en terrazas. Las principales limitaciones que presenta esta técnica son la baja capacidad de secado por unidad de superficie, la dependencia de las condiciones climáticas y la mayor necesidad de mano de obra para la operación y de superficie plana para la instalación, en comparación con otras técnicas de secado más refinadas. Esto hace que el uso de la terraza quede limitado a predios de menor volumen de producción.

La estimación del tiempo de secado en terrazas es compleja, en vista del número de variables que entra en el cálculo, en relación con el producto y con las variaciones de las condiciones climáticas durante el periodo de secado. El cálculo de la superficie de terraza que se necesita para secar una producción determinada, en una cosecha determinada, debe tomar en cuenta la estimación del tiempo de secado.

### 2.3.1.2 Secado natural en secador rotativo

El secador rotativo que utiliza la energía solar, consta de una caja cuyos costados son de madera, con frente y fondo de malla de alambre. El secador tiene una inclinación variable, pues su eje de rotación está alineado en dirección nortesur. La inclinación debe acompañar el movimiento en dirección sur, en vista de la colocación del secador en diversas posiciones durante el día, para aprovechar mejor la energía solar, principalmente cuando se trata de productos de superficie oscura, como es al caso del café.

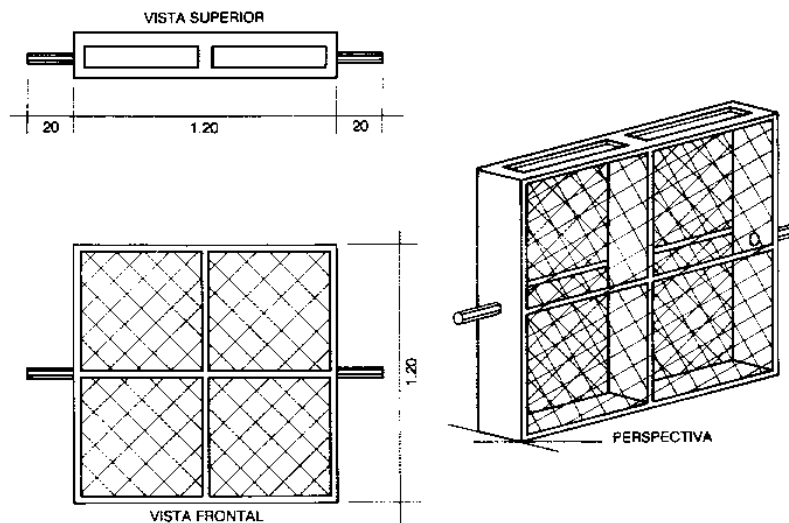


Figura 2.7. Plano del secador rotativo [13].

Las variables que influyen en el proceso de secado en secador rotativo son las mismas del secado en asoleaderos, la diferencia fundamental está en el hecho de que en los secadores rotativos, además de aprovechar mejor la energía solar, generalmente se aprovecha también mejor la acción del viento, dado que,

dependiendo de la dirección de éste, el aire pasa a través de la capa de producto y facilita el secado de toda la masa.

El espesor de la capa de producto en el secador rotativo puede ser hasta de 0.15 m. Cuanto menor sea el espesor de la capa de producto, más fácil será la penetración del aire. La acción de revolver el producto, mediante la rotación, es importante para que la humedad final sea uniforme en toda la masa.

### **2.3.2 Secado de granos a bajas temperaturas o en silos.**

El secado de granos a bajas temperaturas es un método artificial en donde se utiliza aire natural o aire ligeramente calentado (1 a 5°C por encima de la temperatura ambiente). En general, este proceso se realiza en silos secadores y almacenadores en donde, luego del secado, el producto queda almacenado en el mismo lugar.

Para que un silo sea utilizado para el secado a bajas temperaturas, debe presentar las siguientes características especiales que no se exigen a los silos que sirven sólo para almacenar. La primera de estas características se refiere al piso, el cual debe ser hecho totalmente de metal, con un 10%, por lo menos, de su superficie perforada, para promover la distribución uniforme del aire, factor importante en la seguridad del proceso. El ventilador debe proporcionar una cantidad de aire suficiente para efectuar el secado de toda la masa de granos sin que haya deterioro. Las dimensiones del silo (diámetro y altura) condicionan la potencia del ventilador que se necesita para realizar el secado.

El secado a bajas temperaturas es un procedimiento lento; puede tardar una semana o, en determinados casos, hasta un mes. Tal lentitud se debe a la pequeña cantidad de aire que se utiliza por unidad de masa de granos por secar y a la dependencia del sistema respecto de la capacidad del aire para evaporar agua, muy inferior a la de los sistemas que emplean temperaturas elevadas. La capacidad del aire para evaporar la humedad del producto, denominada también potencial de secado, determina el contenido final de humedad que alcanzarán los granos al término del proceso. Una región en que haya baja humedad relativa media tendrá mayor potencial de secado que las regiones de alta humedad relativa media, y determinará, por tanto, un menor contenido de humedad final.

Los ventiladores producen calentamiento del aire, normalmente en un rango de 1 a 2°C y reducen la humedad relativa. Se han usado también combustibles, resistencias eléctricas o colectores solares para complementar la energía. No obstante, el uso de una fuente suplementaria de energía debe estar condicionado al potencial de secado de la región y al contenido de humedad final que se persigue. En la mayoría de los casos, el potencial de secado del aire natural y el calentamiento que provoca el ventilador son suficientes para obtener el contenido de humedad final recomendado para un almacenamiento seguro. El uso indebido de la fuente suplementaria de energía puede provocar problemas de secado excesivo, especialmente en las capas inferiores. Cabe recordar que el secado excesivo causa perjuicio al usuario, quien venderá un grano de menor peso al no tener el contenido máximo de agua permitido y además habrá gastado más energía en el secado excesivo.

Un sistema de secado a bajas temperaturas, si está debidamente proyectado y manejado, es un método de secado económico y técnicamente eficiente. Cuando se trata de unidades menores, por ejemplo para almacenamiento en el campo, el sistema resulta interesante por la inversión inicial, inferior a la que necesitan los sistemas que emplean temperaturas elevadas. Hay un límite a partir del cual los costos de los sistemas de bajas temperaturas pasan a ser superiores a los de los sistemas de altas temperaturas, porque a mayor cantidad de granos, mayor tendrá que ser el número de silos para realizar el secado.

Algunos grandes productores de granos para semillas han optado por el secado a bajas temperaturas, debido a la calidad final del producto, la cual es mejor que la que se obtiene con los secadores que emplean aire a temperaturas elevadas, porque la pérdida de humedad es lenta y el producto no sufre choques térmicos; con esto se reduce la presencia de tensiones internas en los granos, las que podrían perjudicar su calidad. Además, en los sistemas de bajas temperaturas el producto sufre menos movimiento, lo que reduce los daños mecánicos.

Una de las grandes limitaciones del secado a bajas temperaturas se refiere al contenido de humedad inicial. Sabemos que, cuanto mayor es el contenido de humedad de un producto, más acelerado es su deterioro, mientras no se reduzca la humedad hasta un nivel seguro para el almacenamiento. Esto significa que la necesidad de aire para el secado aumenta, por el mayor riesgo de deterioro y por el hecho de que el producto contiene más humedad que hay que eliminar. Por tanto, para secar un producto con mayor contenido de humedad se necesita un ventilador con motor más potente. Otro factor que hay que considerar es la temperatura media del aire, pues el proceso de deterioro también se acelera con el aumento de la temperatura.

### **2.3.2.1 Principios de secado a bajas temperaturas**

#### **2.3.2.1.1 Contenido de humedad de equilibrio**

El secado a bajas temperaturas se parece al secado en el campo. El producto puede perder humedad hasta que se alcance el equilibrio entre la humedad del aire y la del grano. Como ese tipo de secado es lento, al término del proceso casi la totalidad de la masa de granos va a estar en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicrométricas medias del aire de la región.

La diferencia entre los dos tipos de secado está en el tipo de movimiento del aire: en el secado a bajas temperaturas el aire pasa a través de la masa de granos por acción de un ventilador, en tanto que el secado en el campo se produce por el movimiento natural del aire (viento).

El potencial de secado de una región determina el contenido de humedad final que alcanzará la masa de granos, porque hay un contenido de humedad de equilibrio del producto, respecto de cada combinación de temperatura y humedad relativa.

En el secado a bajas temperaturas, la temperatura y la humedad relativa varían durante el proceso. Los valores medios de las temperaturas y humedades relativas, durante el periodo de secado, determinan el contenido de humedad final.

#### 2.3.2.1.2 Deterioro

En los sistemas de secado a bajas temperaturas, los hongos son una de las causas principales de deterioro de los granos. El ataque de este tipo de microorganismos puede causar las siguientes pérdidas: a) disminución del poder germinativo; b) decoloración parcial o total del grano; c) transformaciones bioquímicas; d) producción de toxinas que pueden ser dañinas si las consumen animales o seres humanos; y e) pérdida de peso.

El contenido de humedad es un factor de gran influencia en el desarrollo de hongos. Los productos con elevado contenido de humedad son muy susceptibles al ataque de hongos porque la atmósfera intergranular presenta una humedad relativa alta, factor fundamental para la actuación de los hongos.

El proceso de respiración causa liberación de energía por oxidación de carbohidratos y otros nutrientes orgánicos. Si esa energía no se disipa, la temperatura de la masa de granos aumenta y favorece aun más el desarrollo de hongos.

#### 2.3.2.1.3 Proceso de secado en el silo

El secado a bajas temperaturas comienza en la parte inferior del silo y va subiendo hasta llegar a la superior. Durante el secado se distinguen en el silo tres capas distintas de contenido de humedad, como se ilustra en la siguiente figura. La primera capa se compone de granos secos; el producto ya alcanzó el equilibrio higroscópico con las condiciones del aire. En la segunda capa, denominada frente de secado, se realiza efectivamente la transferencia de humedad del producto al aire. El espesor de esta capa varia, en general, entre 30 y 60 cm. La tercera capa se compone de granos húmedos, cuyo contenido de humedad se aproxima al inicial, pues el aire pasa por esa capa con su capacidad de secado agotada. La temperatura de esa capa es normalmente inferior a la del aire que entra al silo, puesto que la evaporación de la humedad, en el frente de secado, enfría el aire.



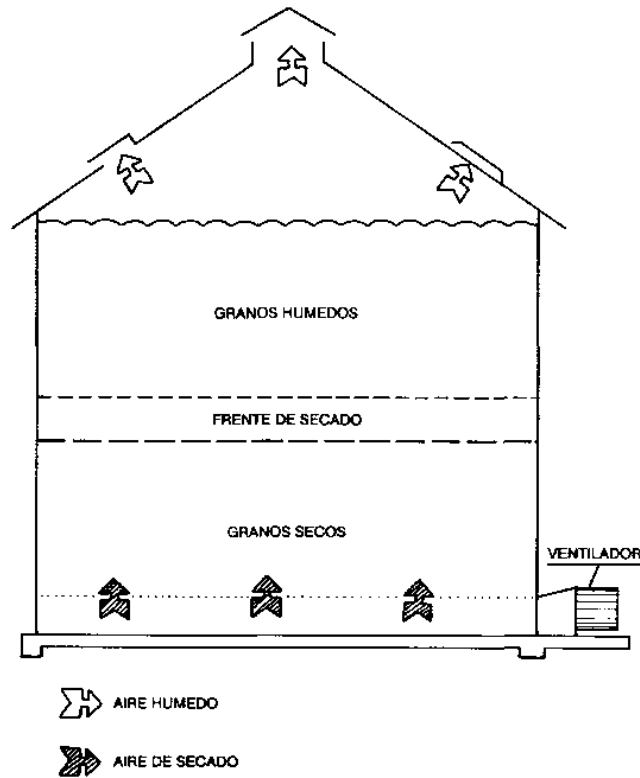


Figura 2.8. Secciones con distintos contenidos de humedad durante el secado de granos a bajas temperaturas dentro de un silo [13].

#### 2.3.2.1.4 Aumento del movimiento del aire o aumento de la temperatura del aire

Hay dos maneras de disminuir la duración del secado a bajas temperaturas; a) aumentando el caudal del aire, y b) aumentando la temperatura del aire. La elección de uno de los dos métodos se debe basar en el potencial de secado de la región en que se instalará el silo secador.

En general, el calentamiento del aire se recomienda solamente en regiones en que el potencial de secado del aire natural es insuficiente para que se alcance el contenido de humedad final que se busca. El calentamiento del aire no aumenta, prácticamente, la velocidad de desplazamiento del frente de secado, e interesara únicamente durante los períodos de alta humedad relativa del aire, ya que no habría detención del desplazamiento del frente de secado.

El aumento del caudal de aire tiene más influencia sobre el tiempo de secado, pues la velocidad de desplazamiento del frente de secado es directamente proporcional al flujo de aire por unidad de masa del producto que hay que secar. En lugares donde la humedad relativa del aire es alta, el aumento del caudal del aire no es suficiente para lograr el secado, pues esa variable no influye en el potencial de secado del aire.

### 2.3.2.1.5. Flujos de aire mínimos para secado a bajas temperaturas

La elección de un flujo de aire adecuado tiene vital importancia para el éxito de los sistemas de secado a bajas temperaturas. Si el flujo de aire es inferior al valor adecuado, hay demora en el secado y se puede comprometer la calidad del producto. Si el flujo de aire es superior al valor adecuado, si bien disminuye el tiempo de secado, aumenta el consumo de energía para accionar el ventilador y aumenta, por tanto, el costo operativo del sistema, además de exigir una mayor inversión inicial.

Los flujos de aire recomendados para el secado, que también se conocen como flujos mínimos de aire, se expresan normalmente en función de la unidad de volumen del producto. El flujo mínimo de aire depende de los factores siguientes:

a) tipo de producto, b) clima de la región y c) contenido de humedad inicial.

La dependencia del tipo de grano está ligada a la mayor susceptibilidad al deterioro que presentan algunos granos, en relación con otros, debido a su composición química y a la facilidad que tienen los hongos para penetrar en su interior en busca de alimento para sobrevivir. De tal modo, las necesidades de aire para secar el arroz son diferentes de las necesidades del maíz, por los factores citados. La influencia del clima de la región determina el potencial de secado: en regiones en que hay grandes probabilidades de que ocurran períodos prolongados de elevada humedad relativa, durante la época de secado, se necesita un flujo de aire mayor o bien calentamiento suplementario, o ambas cosas, por el mayor riesgo del proceso. El contenido de humedad inicial también es un factor que determina el flujo mínimo, pues está directamente relacionado con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos. Los granos que tienen un alto contenido de humedad son atacados con más facilidad por los hongos, por lo que están más expuestos al deterioro. Así, los productos cuyo contenido de humedad inicial es alto necesitan un flujo de aire mayor.

## **2.4 SECADO SOLAR DE GRANOS**

### **2.4.1 Principios del secado solar**

En los secadores solares, la energía del sol es usada como única fuente de calor requerida o como una fuente suplementaria. El flujo de aire puede ser generado por convección natural o convección forzada. El calentamiento se puede hacer precalentando el aire y haciéndolo pasar a través del producto o por exposición directa del producto a la radiación solar o una combinación de ambos. El mayor requerimiento es la transferencia de calor al producto húmedo por convección y conducción de la masa de aire de circundante a temperatura por encima de la del producto o por radiación, principalmente del sol, o conducción de la superficie caliente en contacto con el producto. El calor absorbido por el producto suministra la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en el producto. El proceso que ocurre en la superficie del producto es simplemente evaporación. El agua empieza a evaporarse de la superficie del producto húmedo cuando la energía absorbida incrementa su temperatura lo suficiente para que la

presión de vapor del agua del producto húmedo exceda la presión de vapor del aire circundante. La humedad del interior del producto va sustituyendo la humedad que se ha ido evaporando, este proceso es por difusión, y este depende de la naturaleza del producto y su contenido de humedad. Si la velocidad de difusión es lenta sería un factor limitante del proceso de secado. En el secado con radiación directa parte de la radiación solar puede penetrar el material y ser absorbido dentro del producto, por lo tanto genera calor en el interior del producto además de la superficie, por lo tanto aumenta la transferencia de calor. La absorción de la radiación solar del producto es un factor importante en el secado solar directo. La mayoría de los productos agrícolas tienen relativamente alta absorción (entre 0.67 y 0.90) [14].

## 2.4.2 Clasificación de los secadores solares

Los sistemas de secado solar se clasifican primeramente de acuerdo a sus modos de calentamiento y la manera en que la energía solar es utilizada. En términos generales, pueden ser clasificados dentro de dos grupos principales [15], a) sistemas de secado solar activos y b) Sistemas de secado solar pasivos.

Existen tres distintas subclases de cada uno de estos secadores, los cuales varían principalmente en el diseño del arreglo de los componentes y el modo de utilizar la energía solar: a) secadores solares tipo integral; b) secador solar tipo distribuido; y c) secador solar modo mezclado.

En la figura 2.9, se presentan las principales características de varias clases de diseños típicos de secadores solares.

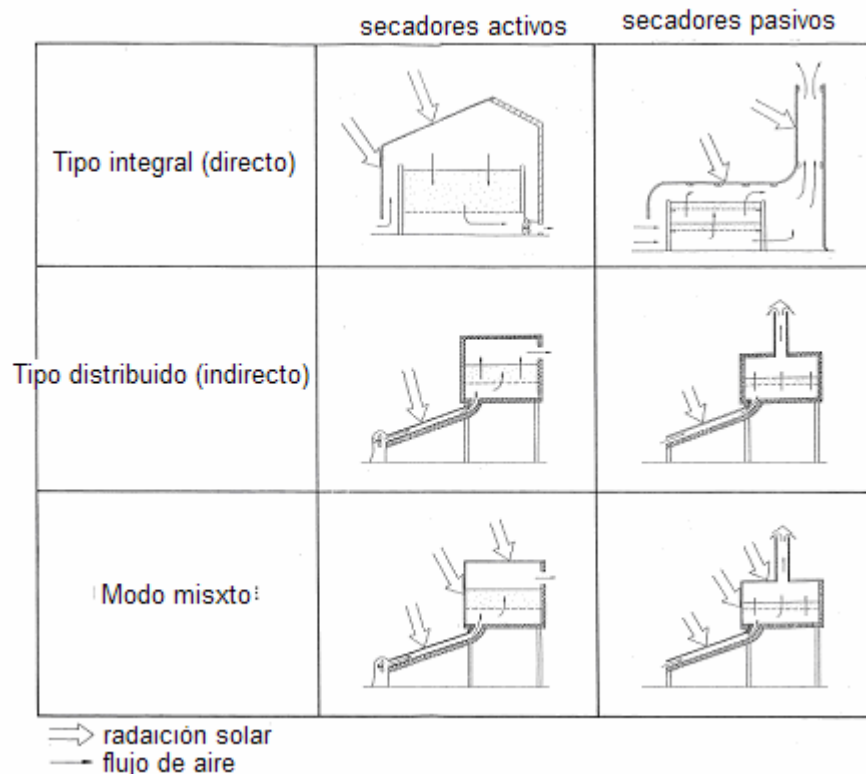


Figura 2.9. Secadores solares [15].

## **2.4.2.1 Sistemas de secado solar pasivos**

### **2.4.2.1.1 Secadores abiertos al sol.**

Hay dos procedimientos tradicionales por lo que el secado solar pasivo de cosechas se desarrollo en algunos en países tropicales, a saber: a) la planta que lleva la cosecha se deja morir, en contacto con el suelo o se reduce, pero no se quita, así la cosecha se seca “in situ” y b) la cosecha se esparce sobre la tierra, piso de cemento o cualquier lugar horizontal o estantes verticales expuestos a la radiación solar y a las corrientes naturales de aire. La cosecha es usualmente removida para exponer diferentes partes del producto al sol y de tal modo estimular la rápida extracción del aire saturado.

A pesar de la rudimentaria naturaleza del proceso, tales técnicas son de uso común, por que los requerimientos de potencia (es decir, la radiación solar y la entalpía del aire) están fácilmente disponibles en el ambiente, los costos iniciales requeridos son muy pequeños y los costos de operación son bajos, estos son con frecuencia los únicos métodos comercialmente viables para secar productos agrícolas en países en vías de desarrollo. Aunque es utilizado extensamente, las técnicas de secado abiertas al sol tienen limitaciones inherentes: altas pérdidas de la cosecha debidas a un secado inadecuado, ingestación de insectos, invasión de aves y roedores, y afectación del clima. El proceso es intermitente, siendo afectado por la nubosidad y la lluvia inesperada. La producción es baja y puede ser de muy baja calidad.

Para climas tropicales, el secado solar posee serios problemas prácticos durante la temporada de lluvias, el producto tiene que ser removido para almacenarse o protegerse durante la lluvia. La calidad del producto secado a menudo se degrada seriamente. Así, actualmente, una gran proporción del suministro mundial de frutas y vegetales secos son secados al sol bajo condiciones primitivas. Mientras métodos de sacado solar mas eficientes están siendo desarrollados, los métodos de secado tradicional tienen los siguientes atributos: a) Bajos costos de inversión; b) Bajos costos de mantenimiento; y c) Independencia del suministro de combustibles.

### **2.4.2.1.2 Secadores solares con circulación natural.**

En estos sistemas, el aire calentado por medio del sol se circula a través del producto como resultado de la presión del viento. Estos secadores a menudo son llamados “pasivos” para distinguirlos de sistemas que emplean ventiladores para transportar el aire a través de la cosecha. Estos últimos son llamados secadores solares “activos” .Los secadores solares con circulación natural aparecen como la opción mas atractiva para usarse en localidades rurales remotas. Son superiores operacionalmente y económicamente competitivos con los secadores abiertos al sol. Las ventajas de los secadores solares con circulación natural que les permite competir económicamente con las técnicas de secado tradicionales son: a) requieren de un área de tierra más pequeña para secar cantidades similares de cosecha que podrían ser secados tradicionalmente sobre áreas grandes de tierra

en el sistema abierto; b) su rendimiento es relativamente alto en cantidad y calidad de producto secado por que es improbable que hongos, insectos y roedores infesten la cosecha durante el secado; c) el tiempo de secado mas corto en comparación con el secado solar abierto, logrando así altas velocidades de procesamiento del producto; d) la protección proporcionada al producto al evitar el maltrato debido a la lluvia repentina; y e) viabilidad comercial, es decir, sus relativos bajos costos de inversión y mantenimiento por la fácil disponibilidad de materiales para su construcción.

Existen tres tipos genéricos de secadores con circulación natural que se han desarrollado y mantienen muchas de las ventajas de los secadores tradicionales abiertos al sol: a) secador solar con circulación natural tipo distribuido; b) secador solar con circulación natural tipo integral; y c) secador solar con circulación natural modo mixto.

#### **2.4.2.1.2.1 Secadores solares con circulación natural tipo distribuido**

Estos son a menudo llamados secadores solares pasivos indirectos. Aquí, el producto esta localizado en bandejas o estantes dentro de una cámara de secado opaca y calentado por circulación de aire, este aire es calentado a través de un colector solar termosifónico. Debido a que la radiación solar no esta directamente sobre el producto, no se produce daño por calor localizado.

Este tipo de secadores tiene mayores temperaturas de operación que los secadores directos y pueden producir mayor cantidad de producto de buena calidad. Sus defectos, sin embargo, son las fluctuaciones en las temperaturas del aire, de este modo se dificulta mantener constantes las condiciones de operación dentro de la cámara de secado, y la dificultad de las operaciones de carga y descarga de las bandejas y la necesidad de revolver periódicamente el producto. Los secadores tipo distribuido, aunque, tienen una inherente tendencia hacia grandes eficiencias, sus componentes se pueden ser diseñar para optimizar la eficiencia de sus respectivas funciones. Son, sin embargo, estructuras relativamente elaboradas que requieren más capital de inversión en equipo y mayores costos de mantenimiento que las unidades integrales.

Un típico secador solar con circulación natural tipo distribuido puede constar de las siguientes unidades básicas: a) un captador de energía solar para el calentamiento de aire; b) una cámara de secado; y c) una chimenea y d) una tubería apropiadamente aislada;

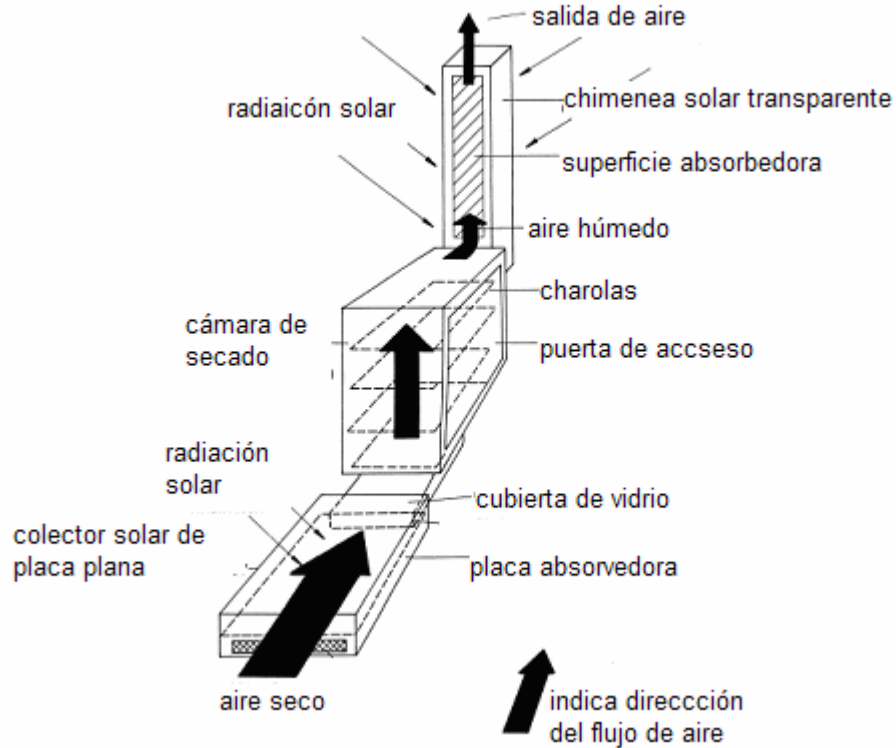


Figura 2.10. Características de un típico secador solar con circulación natural (indirecto) tipo distribuido [15].

Aunque no se han reportado pruebas detalladas, es generalmente aceptado que los buenos diseños de secadores solares distribuidos con convección forzada son más efectivos y más controlables que los tipos de secadores con circulación natural [15]. Así, la mayoría de los secadores solares distribuidos realizados prácticamente son de tipo activo (convección forzada). De los tipos con circulación natural incorporados, la mayoría son de diseño de modo mezclado (que mantiene la mayoría de las características de los secadores distribuidos).

#### 2.4.2.1.2.2 Secador solar con circulación natural tipo integral

En los secadores solares con circulación natural tipo integral (con frecuencia llamados secadores solares directos), el producto a secar es colocado en una cámara de secado con paredes transparentes que permiten la entrada de la irradiancia solar necesaria para el proceso de secado. Así, la radiación solar incide directamente sobre el producto. El calor extrae la humedad del producto y baja la humedad relativa del aire residente, de este modo incrementa su capacidad para remover humedad. Además, se expande el aire en la cámara, generando su circulación y la subsiguiente extracción de humedad junto con el aire caliente. Las características de un típico secador solar pasivo integral se ilustran en la figura 2.11.

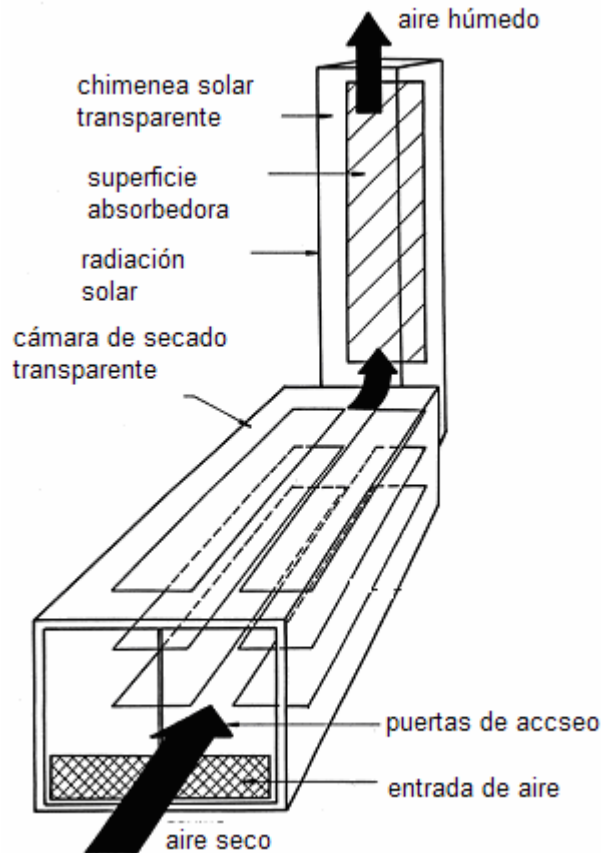


Figura 2.11. Características de un típico secador solar con circulación natural tipo integral [15].

Los secadores solares con circulación natural tipo integral son más simples y baratos en su construcción que los de tipo distribuido para una misma capacidad de carga. Sin embargo, su desventaja potencial es el calor excesivo localmente (de tal modo que ocasiona daños en el producto) y la relativa baja velocidad de secado que alcanza debido a la pobre remoción de calor. Para superar estas limitaciones, se puede implementar una chimenea solar, que incrementa la corriente de aire, para proveer una mayor velocidad de flujo de aire, así, una remoción de humedad más rápida. Se cuenta con dos tipos de secadores de tipo integral: a) Secador de gabinete solar pasivo; y b) Secador tipo invernadero con circulación natural.

#### 2.4.2.1.2.2.1 Secador de gabinete solar pasivo.

Este tipo de secador solar es una pequeña unidad para preservar frutas, vegetales, pescado y carne para consumo familiar. Por lo general son cajas aisladas con una o dos cubiertas de vidrio, con hoyos en la base y en la parte superior de las paredes del gabinete. La radiación solar necesaria para el proceso de secado es transmitida a través de la cubierta de vidrio y es absorbida por la superficie interior ennegrecida y por el producto mismo. La circulación de aire es

proporcionada por el aire caliente húmedo que sale del gabinete a través de las aberturas superiores mientras es llenado con aire fresco que entra por la base.

La figura 2.12 presenta un secador solar tipo gabinete y sus principales características.

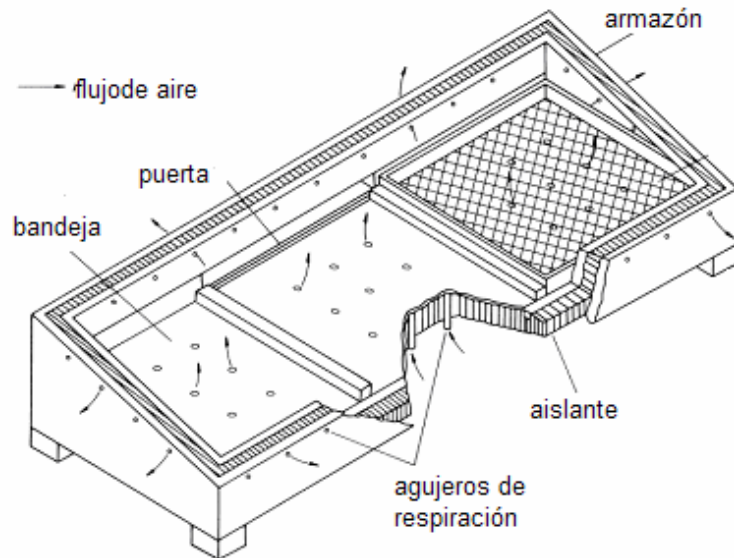


Figura 2.12. Secador solar pasivo de gabinete con circulación natural [15].

Este tipo de secador tiene la ventaja de que su construcción es sencilla y económica, ya que se puede fabricar con materiales disponibles localmente. Su mayor desventaja es la baja capacidad para extracción del aire húmedo, y esto reduce su velocidad de secado, y las altas temperaturas internas que aumentan la probabilidad de sobrecalentamiento del producto. La temperatura del aire de secado esta entre 70 y 100 °C, estas temperaturas son excesivas para la mayoría de los productos. Se recomienda aumentar las entradas de aire y colocar una chimenea solar en la salida para aumentar las velocidades de flujo de aire, esto minimiza las temperaturas internas excesivas y mejora las velocidades de secado [15].

#### **2.4.2.1.2.2 Secador con circulación natural tipo invernadero.**

Este tipo de secador solar esta equipado con respiraderos posicionados apropiadamente para controlar el flujo de aire, tienen extensas cubiertas de vidrio en sus lados. Se pueden colocar paneles aislantes sobre las cubiertas de vidrio en las noches para reducir las pérdidas de calor. Un buen diseño de secadores tipo invernadero permite un mayor control sobre los procesos de secado que los secadores de gabinete y son más apropiados para secado a mayores escalas.



### 2.4.2.1.2.3 Secador con circulación natural modo mixto.

Estos secadores combinan las características de los secadores tipo integrales (directos) y de los tipo distribuidos (indirectos). La acción combinada de la radiación solar que incide directamente sobre el producto y el precalentamiento en un calentador solar de aire suministra el calor requerido en el proceso de secado. Un secador con circulación natural modo mixto (figura 2.13) puede tener las mismas características estructurales que el secador tipo distribuido, la diferencia principal es que las paredes de la cámara de secado son de vidrio para que la radiación incida directamente sobre el producto como en los secadores tipo integral.

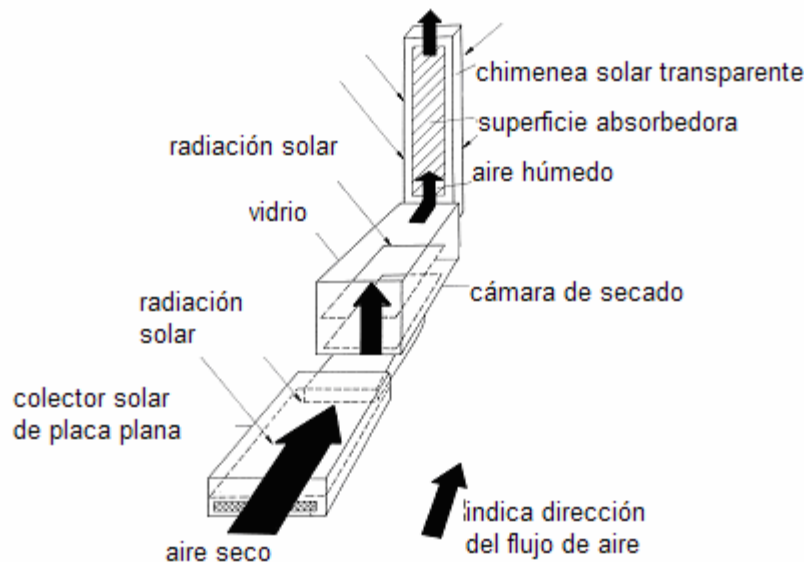


Figura 2.13. Características de un típico secador solar de modo mixto con circulación natural [15].

La figura 2.14, presenta un diseño típico de un secador solar de arroz. La unidad consiste de un calentador de aire solar, un gabinete para la cama de arroz y una chimenea que provee una columna alta de aire caliente para incrementar la corriente de aire. El absorbedor del calentador de aire consiste de una capa gruesa de arroz cáscara cubierta por una lámina de plástico claro sobre un marco inclinado de bambú. La cámara de secado es una caja de madera poco profunda con una base echa de bambú con una estructura bastante abierta para permitir un fácil flujo de aire de secado. Esta cámara esta cubierta con una red de nylon para prevenir que el arroz caiga a través de ella. Una lámina de plástico claro cubre la cama de arroz para permitir el calentamiento directo del arroz, esta lámina también sirve para protegerlo de la lluvia. La chimenea generalmente esta hecha de

bambú, (aunque puede usarse otro material) recubierta de una lámina de plástico oscuro.

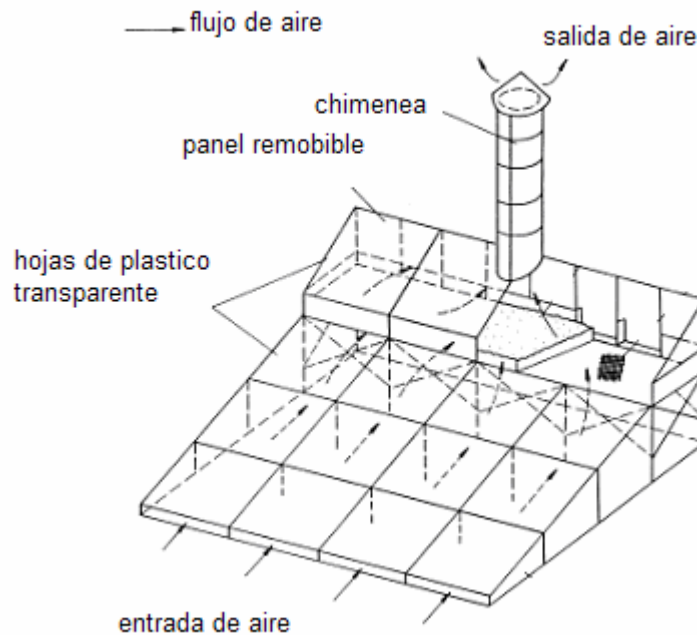


Figura 2.14. Secador solar modo mixto con circulación natural para arroz [15].

#### 2.4.2.2 Sistemas de secado solar activos

Los sistemas de secado solar activo dependen solo parcialmente de la energía solar. Un típico secador solar activo utiliza solamente la energía solar como fuente de calor pero emplea ventiladores y bombas para la circulación forzada de aire. Existe una variedad de secadores solares activos que pueden ser clasificados en: tipo integral, tipo distribuido y secadores de tipo mixto.

##### 2.4.2.2.1 Secador solar activo tipo integral.

En estos secadores la unidad de captación de la energía solar es una parte integral del sistema y el producto absorbe directamente la radiación solar, y no se requieren captadores solares por separado. En la figura 2.15 se presenta un ejemplo de este tipo de secador. Es un secador tipo invernadero con convección forzada, el techo y las paredes están hechos con una cubierta transparente para que la radiación solar incida directamente sobre el producto.

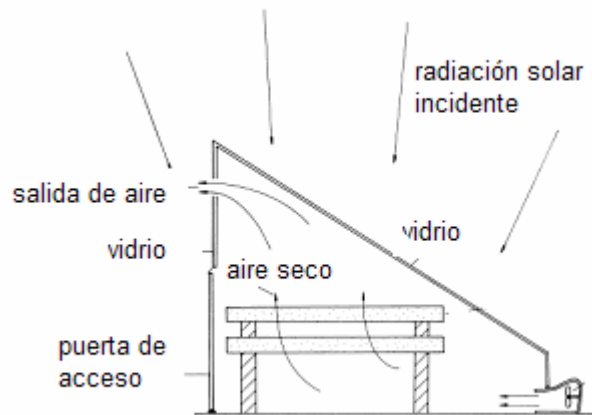


Figura 2.15. Secador tipo invernadero con convección forzada [15].

#### 2.4.2.2.2 Secador solar activo tipo distribuido

En este tipo de secador, el captador solar y la cámara de secado son unidades separadas. Este secador está compuesto de cuatro componentes básicos a) la cámara de secado, b) el calentador de aire solar c) el ventilador y el conducto. La figura 2.16, presenta un ejemplo de este tipo de secador.



Figura 2.16. Características de un típico secador solar tipo distribuido [15].

En los secadores convencionales, la eficiencia de secado se incrementa con el incremento en la temperatura [15]. Sin embargo, para este tipo de secadores esto no es así, por que la eficiencia de los colectores solares decrece a temperaturas altas. Así, una decisión crítica en el diseño de los secadores activos distribuidos será elegir entre altas temperaturas en el aire de secado y, consecuentemente, bajas velocidades en el flujo de aire (esto implica el uso de

ventiladores y el requerimiento de altos niveles de aislamiento); o el empleo de bajas temperaturas de secado, esto minimiza el costo del aislante ya que las pérdidas de calor son bajas. Sin embargo, de los secadores activos distribuidos de alta temperatura son significativamente mejor por sus altas velocidades de flujo de aire, de esta forma se tiene que hacer un balance entre la medida del ventilador usado y el nivel de aislamiento para un costo efectivo del diseño.

#### 2.4.2.2 Secador solar activo tipo mixto.

Este tipo de diseño no es muy frecuente en el diseño de secadores solares activos. Los diseños de modo mixto combinan algunas características de los del tipo integral y de los distribuidos. Los secadores tipo mixto comprende los siguientes componentes: a) un calentador solar de aire, b) conductos de aire, c) una cámara de secado separada y un d) ventilador como en los secadores de tipo distribuido. Sin embargo, la cámara de secado es de vidrio para que el producto absorba directamente la radiación solar como en un secador tipo integral. Las características de un secador solar activo tipo mixto se ilustran en la siguiente figura.

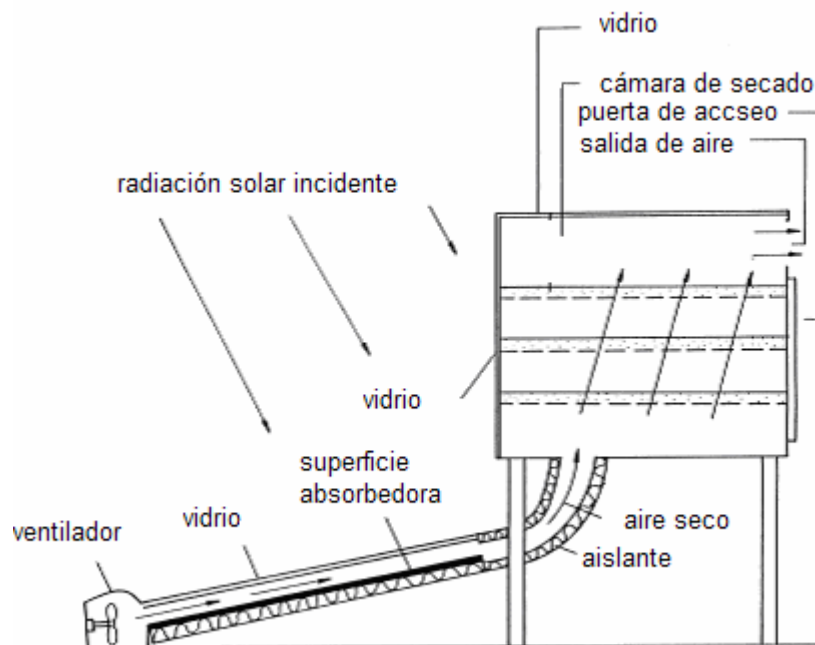


Figura 2.17. Características de un secador solar tipo mixto [15].

#### 2.4.3 Captadores solares para calentamiento directo de aire

Los captadores solares son dispositivos empleados para aprovechar la energía térmica de la radiación solar incidente. Pueden ser de placa plana o de concentración óptica. Los de concentración operan a mayor temperatura que los de placa plana. Para aplicaciones de secado con energía solar, los captadores de placa plana proveen la temperatura deseada y son más económicos que los captadores de concentración más complejos. Un captador solar consiste

básicamente de una superficie que absorbe la radiación solar y la transmite en forma de calor al fluido de trabajo (comúnmente agua o aire), [16].

#### 2.4.3.1 Tipos de captadores solares para calentamiento de aire.

Existen dos tipos de captadores solares para el calentamiento de aire: los de placa descubierta y de placa cubierta.

##### 2.4.3.1.1 Colectores solares para calentamiento de aire con placa descubierta.

La figura 2.18, representa este tipo de captador, el cual consiste simplemente de un conducto de aire, la superficie de arriba actúa como placa absorbidora de la energía solar con la superficie posterior aislada. Se usa ampliamente en las operaciones de secado tanto en convección forzada como en convección natural.

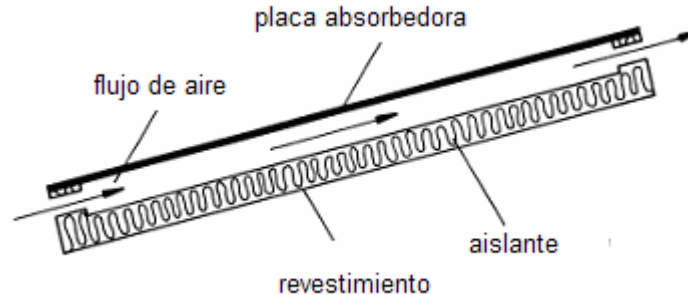


Figura 2.18. Colector solar para calentamiento de aire con placa descubierta[16].

Este tipo de colectores tiene relativamente grandes pérdidas térmicas a través de la superficie expuesta, consecuentemente, tienen bajas eficiencias térmicas a temperaturas moderadamente elevadas, pero operan más eficientemente a bajas temperaturas (menos de 10 °C por arriba de la temperatura ambiente), [16]. Su bajo rendimiento es compensado por su simplicidad y bajo costo de construcción.

##### 2.4.3.1.2 Captadores solares para el calentamiento de aire con cubierta.

Las pérdidas de calor hacia arriba de los calentadores solares de aire son minimizadas por el uso de una o más cubiertas transparentes. Comúnmente el material usado en las cubiertas transparentes es vidrio, o material plástico transparente. La cubierta impide las pérdidas convectivas de calor por la placa absorbidora, reduce las pérdidas de calor radiativas y protege la placa absorbidora contra las lluvias. Estos colectores operan con mayor eficiencia térmica que los de placa descubierta a temperaturas moderadas, sin embargo, el costo se incrementa, y como los materiales de las cubiertas son vulnerables a romperse, el costo de mantenimiento también se incrementa. Los colectores con

cubierta, se recomiendan generalmente para operar con temperaturas entre 10°C y 35°C por arriba de la ambiente.

2.4.3.1.2.1 Tipos de calentadores de aire con cubierta. Existen dos tipos de calentadores de aire con cubierta, a) con paso del aire por arriba de la placa absorbadora (frontal) y b) con paso del aire por abajo de la placa absorbadora (atrás), c) cubierta y placa suspendida y d) con cubierta y placa perforada.

2.4.3.1.2.1.1 Captadores solares para calentamiento de aire con placa cubierta con paso de aire por arriba de la placa absorbadora (frontal).

En este tipo de captador solar, el aire se calienta su paso en el conducto formado entre la cubierta transparente y la placa absorbadora. El calor se transfiere al aire a través del lado superior del absorbedor. La figura 2.19, representa este tipo de captador solar para el calentamiento de aire.

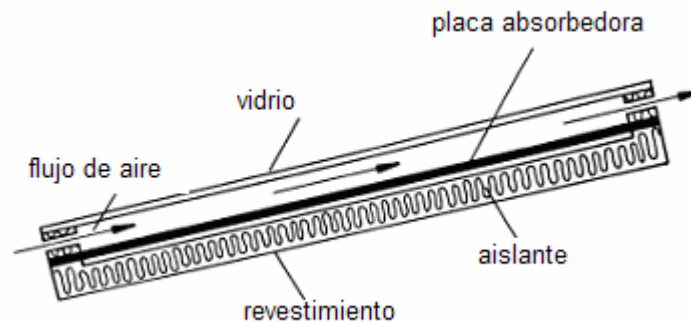


Figura 2.19. Colector solar para calentamiento de aire de paso frontal [16].

2.4.3.1.2.1.2 Colectores solares para calentamiento de aire de placa cubierta con paso atrás.

Aquí la placa absorbadora esta colocada directamente detrás de la cubierta transparente, con una capa de aire estático separándola de la cubierta. El aire a calentar fluye entre la superficie interna del absorbedor y la placa de aislante, con transferencia de calor por medio del lado interior del absorbedor. Las experiencias han demostrado que este tipo de captador solar es más eficiente que los de paso frontal [3]. La figura 2.20, representa este tipo de captador solar.

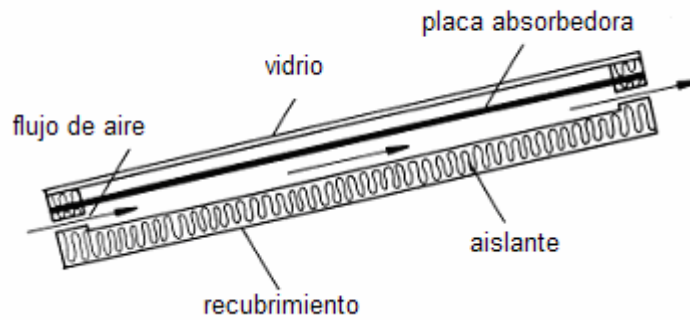


Figura 2.20. Colector solar para calentamiento de aire con paso atrás [16].

#### 2.4.3.1.2.1.3 Colectores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa suspendida.

La placa absorbedora está fija entre la cubierta y el aislante. El aire fluye por los dos lados del absorbedor, esto incrementa el área de transferencia de calor. La placa absorbedora está a una temperatura baja y consecuentemente tendrá menores pérdidas de calor radiativas. En la figura 2.21, se pueden observar dos distintas configuraciones de este tipo de calentadores, el calentador solar de aire de paso paralelo (figura 2.21 a) y el calentador solar de doble paso (figura 2.21 b). Estos calentadores solares de aire, operan con eficiencias mayores que los calentadores de placa descubierta, paso frontal o paso atrás.

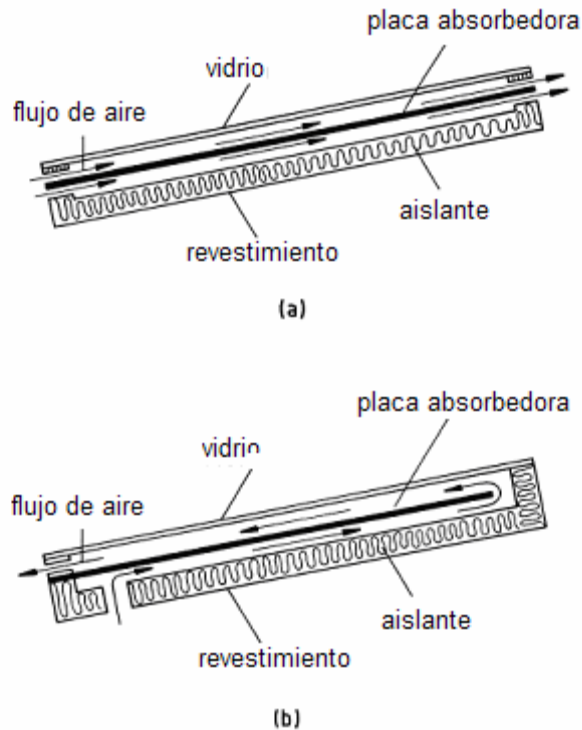


Figura 2.21 Colectores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa suspendida: (a) Paso paralelo; (b) Doble paso [16].

#### 2.4.3.1.2.1.4 Captadores solares para calentamiento de aire con cubierta y placa perforada.

Es una modificación de los colectores con placa suspendida. Están contruidos por lo general, con un absorbedor altamente poroso, como una gasa ennegrecida o viruta de madera. Debido a su porosidad hay un incremento en el área de transferencia de calor entre el aire y la placa absorbedora. La figura 2.22 representa este tipo de captador solar.

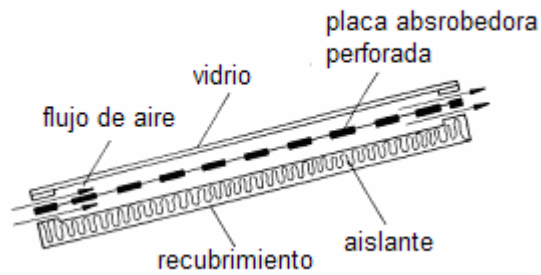


Figura 2.22 Captador solar para el calentamiento de aire con placa perforada.



## CAPÍTULO III

# DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR COMBINADO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO PARA EL TRATAMIENTO DE ARROZ

## **3 DISEÑO DEL SECADOR SOLAR COMBINADO (TÉRMICO-FOTOVOLTAICO).**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

#### **3.1.1 Consideraciones de diseño**

Las características generales de diseño y funcionamiento del secador solar combinado, SSC, se establecieron en el capítulo I, las cuales quedan resumidas en lo siguiente: el secador solar combinado estará constituido de un túnel de secado para el tratamiento de los granos, el cual incluye un sistema para la circulación el acondicionamiento térmico del aire. El sistema de secado debe estar diseñado para establecer las condiciones de temperatura y velocidad del aire necesarias para el secado del arroz, deberá funcionar durante el día, durante la noche y continuo (día y noche), el suministro total de energía será preferentemente solar, con un aporte mayor al 80%. El secador combinado puede operar solo circulando el aire sin aporte de calor con circulación forzada o natural a través de la utilización de un tiro inducido por una chimenea termosolar, donde el aire circula libremente a través del túnel. La energía térmica será a través de sistemas de calentamiento indirecto y directo de aire y los requerimientos de energía eléctrica se proveerán por medio de un sistema solar fotovoltaico. El secador tendrá integrado un sistema de calentamiento auxiliar que opere con combustibles convencionales o con residuos orgánicos. El prototipo tendrá un carácter modular, cuya capacidad de tratamiento podrá aumentar en función de los requerimientos y las características de la demanda, podrá apoyar tanto a los pequeños productores como ser acopio para tratar varias cosechas y podrá extender su aplicación para el tratamiento de otros productos alimentarios, previo estudio de las características propias de cada una de las cinéticas de secado. Su diseño debe ser sencillo para facilitar su construcción, operación y mantenimiento así como rentable desde el punto de vista económico.

Con base a lo anterior se diseñara un prototipo de secador solar combinado que cumpla con la mayoría de las especificaciones antes descritas.

#### **3.1.2 Descripción general**

El secador solar combinado consiste de un túnel horizontal de forma rectangular con una sección constante de flujo, en donde se hace circular aire de manera natural o forzada. El aire se calienta a través de dos sistemas termosolares; uno indirecto y otro directo. Todo el suministro de corriente eléctrica es proporcionado por un sistema solar fotovoltaico. En el túnel de secado se encuentra integrado el intercambiador de calor, aire-agua, y las bandejas en donde se contiene al grano de arroz. El SSC contiene además los sistemas de

circulación de agua y de aire, a través de bombas y de un ventilador y esta instrumentado para sensar las variaciones de temperatura y velocidad del aire, así como para la determinación de las variaciones de humedad y temperatura en el producto.

### **3.1.2.1 Modos de funcionamiento**

El SSC, esta diseñado para operar con diferentes modos de funcionamiento: básicamente con circulación forzada o con circulación natural. En la circulación forzada se utilizan bombas para mover los fluidos de intercambio térmico, entre los diferentes componentes del sistema tanto para el funcionamiento diurno, nocturno o durante el día y la noche. Existe la posibilidad de operar el SSC con convección natural tanto para la circulación del agua (sistema termosifónico) como para la del aire (efecto chimenea térmica)

#### **3.1.2.1.1 Funcionamiento diurno**

Durante el día, el acondicionamiento térmico del túnel de secado se llevará acabo por medio de un sistema de calentamiento solar indirecto de aire.

##### **3.1.2.1.1.1 Sistema de calentamiento solar indirecto de aire**

El sistema de calentamiento indirecto de aire, SCIA, consiste en un arreglo de captadores solares de tipo de placa plana, un tanque de almacenamiento, y un sistema de circulación de agua. El agua circula a través de un campo de captadores solares planos provocando su calentamiento y es conducida al interior del túnel de secado en donde cede su calor sensible al aire a través de un intercambiador aire-agua. El aire circula a través del intercambiador por medio de un ventilador y es inducido después de su calentamiento al interior del túnel en donde es utilizado para extraer la humedad del producto. En este tipo de funcionamiento el agua circula entre el campo de captadores solares y el intercambiador de calor en el túnel de secado. Este circuito tiene dos opciones de operación, una en donde el agua circula entre el campo de captadores y el túnel de secado y la otra, en donde el agua circula entre el campo termosolar y el tanque de almacenamiento. Para la evaluación térmica de este sistema de calentamiento solar, el campo de captadores solares deberá estar provisto de sensores de temperatura y flujo, así como la instrumentación necesaria para la medición de los diferentes parámetros climáticos y solarimétricos.

#### **3.1.2.1.2 Funcionamiento nocturno**

Para el funcionamiento nocturno del SSC, se utiliza el sistema de calentamiento solar indirecto del aire. En este caso, el agua que circula a través de los captadores solares es conducida hacia el tanque de almacenamiento y recirculada durante todo el día. Al final del día solar, el volumen almacenado de agua caliente puede durante la noche recircularse hacia el intercambiador de calor

aire-agua y calentar el aire para el proceso de secado nocturno o conservarse durante toda la noche y realizar una operación de secado al día siguiente.

### **3.1.2.1.3 Funcionamiento diurno y nocturno**

En este tipo de funcionamiento se utilizan los dos sistemas de calentamiento solar de aire, el indirecto y el directo. Durante el día, para el acondicionamiento del túnel de secado se utiliza el sistema de calentamiento solar directo y al mismo tiempo se opera el sistema indirecto, en donde se circula el agua entre los captadores solares y el termotanque, para su almacenamiento y poder calentar posteriormente el aire en el túnel, durante el período nocturno o en otro tiempo al día siguiente.

#### **3.1.2.1.3.1 Sistema de calentamiento solar directo de aire**

El sistema directo consiste de un banco de captadores solares planos para el calentamiento de aire. El aire que es tomado del exterior para su calentamiento se hace circular por medio del ventilador, al interior de los captadores de manera natural o por medio de la convección forzada, y se introduce al túnel. El calentamiento de aire es en un solo paso, el aire a la salida de la cámara de secado no se recircula, sino que es expulsado al exterior por medio de la chimenea.

#### **3.1.2.2. Sistema solar fotovoltaico.**

Con el objeto de garantizar el funcionamiento de los componentes eléctricos; moto-ventilador, bombas hidráulicas e iluminación, tanto para el funcionamiento diurno como nocturno del secador solar, se propone la utilización de un sistema solar fotovoltaico, el cual está formado por paneles fotovoltaicos, baterías con su sistema de control de carga, así como de luminarias para la operación nocturna.

Parte de la energía eléctrica generada se utilizará para el funcionamiento de los componentes eléctricos durante el día y parte de ella se almacenará en las baterías para su posterior utilización.

#### **3.1.2.3. Sistema de rehidratación de granos.**

Con el objeto de realizar pruebas de secado en granos, fuera de la temporada de cosecha, se propone el uso de un sistema de rehidratación de granos para lograr de manera aproximada las condiciones iniciales de humedad que normalmente se encuentra en el producto en el momento de la cosecha. La velocidad de difusión del agua en el grano depende de muchos factores, de la propia estructura del grano, de la relación grano: agua y de la temperatura, la cual tiene un efecto favorable sobre la difusión. Para acelerar la cinética de la hidratación se propone aumentar la temperatura por medio de un calentamiento eléctrico controlado.

## 3.2 BASES DE DISEÑO

Con base a los resultados obtenidos en el Laboratorio de Secado de la Plataforma Solar del Centro de Investigación en Energía, se determinó que para el secado de arroz de la variedad Morelos, es necesario acondicionar el túnel de secado a una temperatura no mayor de 50 °C, para no deteriorar al grano y con velocidades de aire entre 1.5 y 2.5 ms<sup>-1</sup>.

Se propone procesar 200 kg de arroz seco a una humedad final del 13%. El arroz cosechado en la época de verano tiene una humedad que varía entre un 24 y 27% dependiendo de la región productora.

### 3.2.1 Cálculo de la cantidad de energía para el secado del arroz

La capacidad total del secador solar es de 200 kg de arroz por cada tanda de secado desde una humedad del 25% a una intermedia del 19%, lo que representa una carga inicial de:

$$\frac{100 - 19}{100 - 25}(200kg) = 216kg$$

para la segunda etapa de secado desde una humedad del 19% a una final del 13%, se requiere una carga inicial de:

$$\frac{100 - 13}{100 - 19}(200kg) = 214.8kg$$

Un secador convencional, en buen estado de funcionamiento tiene un consumo energético de poco más de 4,185 kJ por kg de agua evaporada. Esta cantidad se compone aproximadamente de la siguiente manera: 2,511 kJ debido al calor latente necesario para evaporar un kg de agua, 1,255 kJ debidos a las pérdidas por calor sensible que se va con el aire usado, 125 kJ por pérdidas debidas a la conducción, radiación y convección hacia el exterior y cerca de 335 kJ por pérdidas debidas al calor transportado por el grano.

El valor de 2,511 kJ/kg de agua no puede ser disminuido de ninguna forma, pues es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua. Las otras pérdidas se pueden reducir en una cierta forma por medio de mejoramientos en el diseño del secador.

En el caso del secado del arroz con cáscara, como se mencionó, se tienen dos pasos: el primero que va desde una humedad inicial entre un 25 y 27% en base húmeda hasta una humedad entre el 19 y 18%. Después se deja reposar de entre 3 y 5 días y se prosigue el secado en una segunda etapa de una humedad inicial entre un 19 y 18% hasta una humedad final del 13%, adecuada para su almacenaje. El consumo específico de energía va creciendo cuando el grano que ingresa a la secadora tiene menor porcentaje de humedad. Esta menor eficiencia

es debida a que resulta más difícil remover el agua del grano menos húmedo porque esta más fuertemente ligada a la estructura de la semilla.

a) para el primer período de secado, se supone una húmeda inicial del 25% y una intermedia del 19%. Para calcular el porcentaje de humedad a eliminar por kg. de agua se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{H_i - H_f}{100 - H_f} 100(M_p) \quad (3.1)$$

En donde  $H_i$  y  $H_f$  son las humedades iniciales y finales y  $M_p$  la masa de material a secar. Substituyendo los valores en la ecuación se tiene:

$$\frac{25 - 19}{100 - 19} 100(200) = 14.8 \text{ kg de agua a evaporar}$$

y la cantidad de energía a suministrar, tomando el valor recomendado de 4,185 kJ por kg de agua evaporada, se tiene:

$$Q_s = 4,185 \text{ kJ/kg} (14.8 \text{ kg}) = 61,938 \text{ kJ}$$

b) para el segundo período de secado, se supone una húmeda inicial del 19% y una intermedia del 13%. Para calcular el porcentaje de humedad a eliminar por kg. de agua se utiliza la misma relación:

$$\frac{19 - 13}{100 - 13} 100(200 \text{ kg}) = 13.79 \text{ kg de agua}$$

y la cantidad de energía a suministrar, tomando el valor recomendado de 4,185 kJ por kg de agua evaporada, se tiene:

$$Q_s = 4,185 \text{ kJ/kg} (13.79 \text{ kg}) = 57,711.15 \text{ kJ}$$

### 3.2.2 Cálculo del flujo de aire

Conocida la cantidad de agua a evaporar y calculado el consumo energético, se determina la cantidad de aire para transportar la cantidad de calor para mantener la temperatura de trabajo preestablecida.

Para la primera etapa de secado del arroz, se determinó un consumo energético de 61,938 kJ y para la segunda de 57,711.15 kJ. Para fines de cálculo se considera un promedio de 60,000 kJ. Considerando la temperatura de operación del secador de 50 °C y una temperatura ambiente de cerca de 25 °C, se tiene una  $\Delta T$  de 25 °C.

$$V_A = \frac{Q_s}{C_p(T_o - T_a)} \quad (3.2)$$

Donde,  $V_A$  es el flujo volumétrico de aire en  $m^3/h$ ,  $Q_s$  el calor a suministrar al secador  $kJ/h$ ,  $C_p$  el calor específico volumétrico del aire igual a  $1.283 \text{ kJ}/m^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Para un suministro energético promedio de  $60,000 \text{ kJ}/h$ , se obtiene un valor de  $V_A$  aplicando la ecuación anterior.

$$V_A = \frac{60,000 \text{ kJ} h^{-1}}{1.283 \text{ kJ} m^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} (25^\circ\text{C})} = 1875 \text{ m}^3 h^{-1}$$

### 3.2.3 Cálculo de la superficie de captadores solares

Para el cálculo de la superficie necesaria de captación solar  $A_C$  se requiere la energía térmica a suministrar en este caso el calor requerido por día para evaporar el agua del grano en el intervalo de humedades establecido, la fracción de la energía solar a suministrar, la irradiancia solar promedio anual y la eficiencia térmica promedio del sistema solar.

Para este caso, se supone una fracción solar,  $FS$ , del 80%, con una irradiancia promedio anual  $I$ , de  $7 \text{ GJ}/m^2$  año, con una eficiencia térmica del sistema solar del 40%. Para la primera etapa se requiere una cantidad de energía de  $61,938 \text{ kJ}$  y para la segunda de  $57,711 \text{ kJ}$ . Para cada uno de los casos, el cálculo de  $A_C$  se efectúa con la siguiente relación:

$$A_{C_1} = \frac{\text{No. días al año}(Q_s)FS}{I(\eta_{ss})} = \frac{365(61,938 \text{ KJ})0.80}{7 \text{ GJ} / m^2 (0.40)} = 6.28 m^2 \quad (3.3)$$

$$A_{C_2} = \frac{365(57,711 \text{ kJ})0.80}{7 \text{ GJ} / m^2 (0.40)} = 5.85 m^2$$

Se utilizarán captadores solares comerciales con una área efectiva de  $0.90 \times 2.00 \text{ m}$ , siendo  $1.80 \text{ m}^2$  por módulo. Tomado el valor más alto de  $A_C$ , se tiene un número de módulos de:

$$\text{No. módulos} = 6.28/1.80 = 3.5$$

Con el propósito de asegurar el funcionamiento del equipo solar, se adquirirán 5 módulos, haciendo una superficie total de  $9 \text{ m}^2$ .

### 3.3 DISEÑO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS QUE CONSTITUYEN EL SECADOR SOLAR COMBINADO

#### 3.3.1 Túnel de secado

Por el túnel de secado deben circular un flujo volumétrico entre 2000 y 2500  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ , a velocidades de aire, según las especificaciones entre 2 y 2.5  $\text{ms}^{-1}$ , por lo que se determinó una sección transversal de flujo cuadrada de 0.28  $\text{m}^2$ . Para tratar los 200 kg de producto seco, la longitud total del túnel de secado es 6 m con una longitud activa de 5 m. La estructura es metálica y aislada térmicamente. El túnel cuenta con un difusor exterior y un filtro de aire a la entrada. A la salida se tiene una chimenea la cual contiene un recubrimiento negro altamente absorbente, para inducir de manera natural el aire por medio del principio de efecto chimenea térmica, para que el sistema pueda operar también por medio de la convección natural, circulando el aire de manera directa sin calentamiento. El túnel de secado está dividido en 7 secciones, en la primera están instalados el filtro y el sistema de intercambio térmico, entre el agua caliente proveniente del sistema solar y el aire que se introduce al túnel. Este contacto indirecto se lleva a cabo por medio de dos intercambiadores del tipo de tubos aletados conectados en paralelo. En las 6 secciones restantes se colocan las charolas que contienen al grano para su secado. Cada sección aloja tres charolas colocadas en diferentes niveles. La capacidad de cada charola es de aproximadamente 12 kg de arroz al 25%, con un espesor de grano promedio de 6 cm. La figura 3.1, muestra dos vistas generales del túnel de secado, así como la ubicación de las charolas. También se puede observar, en el exterior la ubicación del motor con su soporte y del difusor.

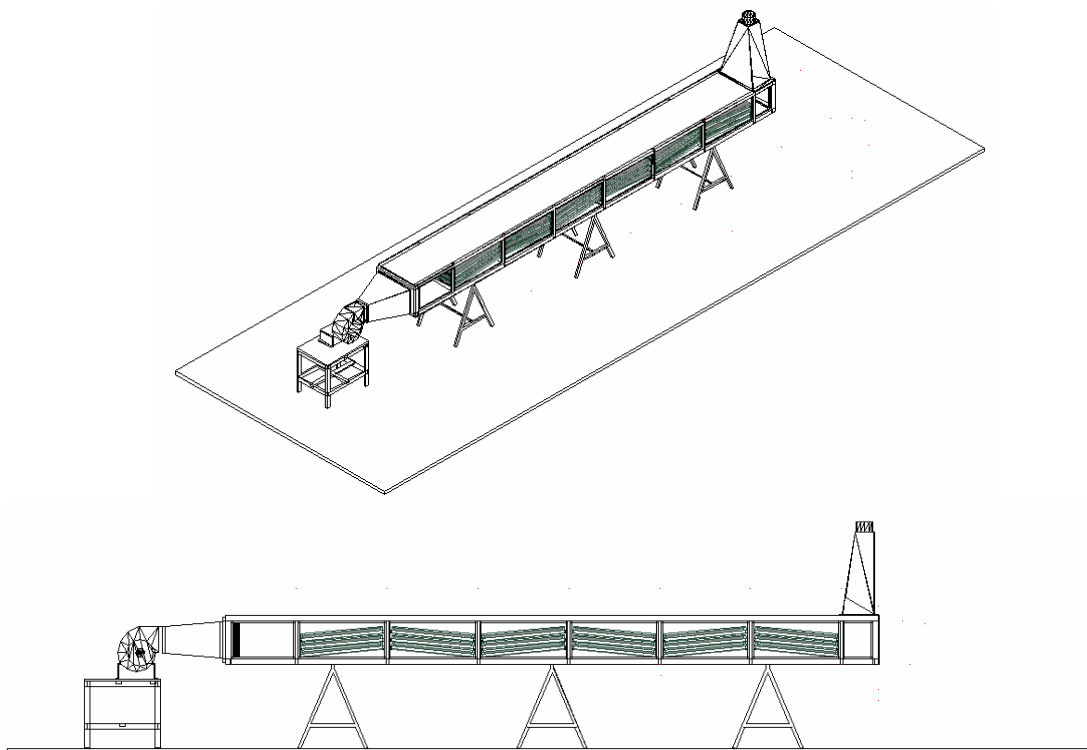


Figura 3.1. Vistas lateral y en isométrico del túnel de secado con las charolas





Figura 3.2. Fotografía del túnel de secado ya instalado.

### 3.3.1.1 Principio de funcionamiento

El aire ambiente es inducido al interior del túnel por medio de un ventilador. El ventilador se seleccionó con base a las especificaciones establecidas en el anexo correspondiente a ventiladores. En este caso se seleccionó un ventilador centrífugo tipo radial con aspas curvadas hacia atrás, con un dominio de flujos entre  $1000$  y  $50000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , y con caídas de presión entre  $200$  y  $1500 \text{ Pa}$ , con una eficiencia entre  $80$  y  $85\%$ , recomendándose su uso para velocidades de aire menores a  $4 \text{ ms}^{-1}$ .

Con respecto al motor, se seleccionó uno de corriente directa, compatible con el sistema fotovoltaico, con una alimentación de  $12\text{V}$  y con un consumo de  $15 \text{ Ah}$ . El aire pasa a través del moto-ventilador y después por el intercambiador de calor, aire-agua, en donde se calienta y se hace circular de manera paralela a través de las secciones libres entre las charolas, extrayendo la humedad de los granos y saliendo frío y húmedo por medio de la chimenea. El aislamiento del túnel disminuye las pérdidas de calor al medio ambiente.

En el túnel de secado se tienen instalados sensores de temperaturas en cada una de las secciones para medir las temperaturas en los granos contenidos en las diferentes charolas, así como fuera de ellas para registrar las variaciones térmicas del aire. También se cuenta con sensores de velocidad y humedad del aire, tanto a la entrada como a la salida del túnel.

En cada una de las charolas se encuentra un recipiente que contiene arroz, cuyo volumen se controla y se aísla para llevar un registro de la pérdida de humedad, mediante su medición utilizando un higrómetro especial para granos. De

esta manera se lleva el registro de la humedad en el grano en cada una de las 18 charolas.

Se registra también la temperatura de entrada y salida del agua en el intercambiador aire-agua, así como el flujo de la misma, el cual se controla en función de la temperatura del agua caliente.

### 3.3.2 Circuito de calentamiento indirecto

El circuito de calentamiento solar indirecto de aire, consiste de un campo de 5 captadores solares planos con un área total de captación de 9 m<sup>2</sup>. Los captadores solares están contruidos en cobre y son del tipo de aletas y tubos con una cubierta de vidrio transparente. La capacidad de almacenamiento se estima dentro del dominio de 60 y 80 l/m<sup>2</sup> de captador solar, siendo en este caso un volumen máximo estimado para una temperatura de agua caliente entre 45 y 50 °C de entre 540 y 720 l. En este caso se adquirió un termotanque comercial con una capacidad de 500 litros, que fue el más próximo a las condiciones de diseño. Con este volumen menor se podrán alcanzar temperaturas más altas en el sistema. Este circuito cuenta además con dos bombas para la circulación del agua caliente, una operando con corriente alterna y la otra con corriente directa, ambas conectadas en paralelo, dependiendo del tipo de funcionamiento establecido. En este circuito hidráulico están instalados sensores de temperatura, los cuales registran las variaciones a la entrada y salida del campo termosolar y del sistema de intercambio, así como las variaciones de los flujos de agua caliente. La figura 3.3 representa de manera gráfica el circuito hidráulico completo que funciona con convección forzada.

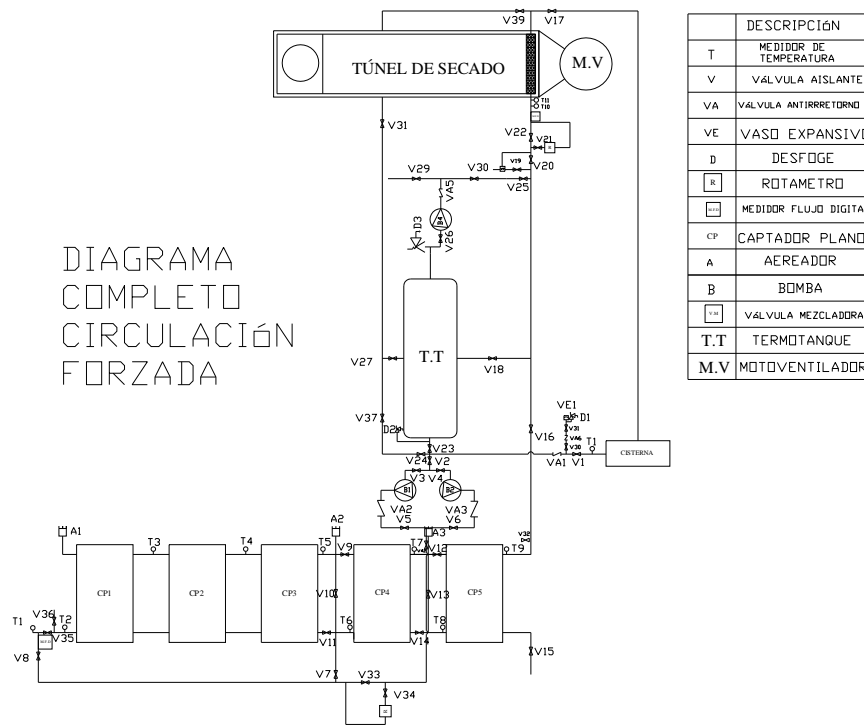


Figura 3.3. Diagrama del circuito hidráulico con circulación forzada.

### 3.3.2.1 Principio de funcionamiento.

En el circuito de calentamiento indirecto se tienen dos sub-circuitos; en uno de ellos se recircula el agua entre el campo de colectores y el intercambiador aire-agua ubicado en el túnel de secado (figura 3.4). En este tipo de funcionamiento, se establece que el flujo de intercambio de calor es el mismo tanto en el campo como en el intercambio aire-agua. Además se tendrán variaciones en las temperaturas debido a los cambios en la radiación solar incidente, requiriéndose una regulación de temperatura en el túnel por medio de la variación en la velocidad del aire.

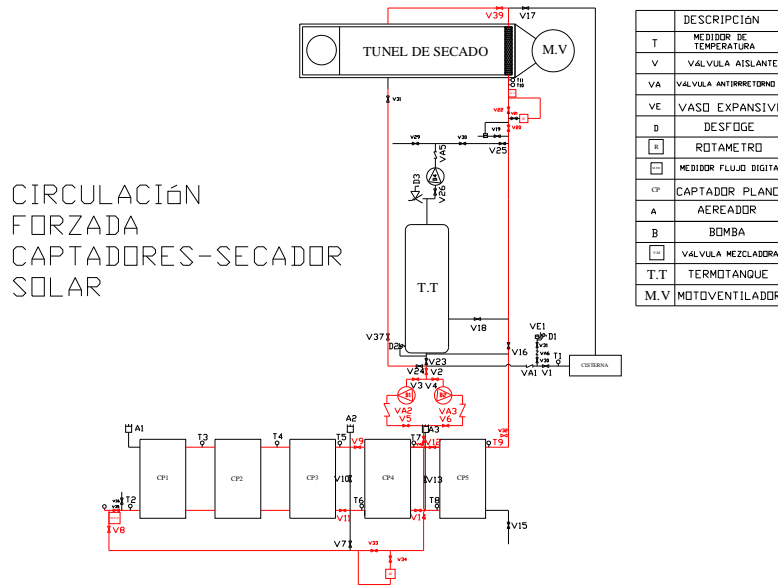


Figura 3.4. Circulación entre los captadores solares y el intercambiador de calor.

En el segundo sub-circuito, el agua se recircula entre el campo de captadores solares y el tanque de almacenamiento térmico (figura 3.5). Una segunda bomba hidráulica envía el agua caliente del termotanque hacia el intercambiador aire-agua en el túnel de secado. Este circuito se utilizará en los períodos de escasa o nula radiación solar y en períodos nocturnos. En este circuito como en los anteriores se cuenta con sensores de temperatura y de flujo.

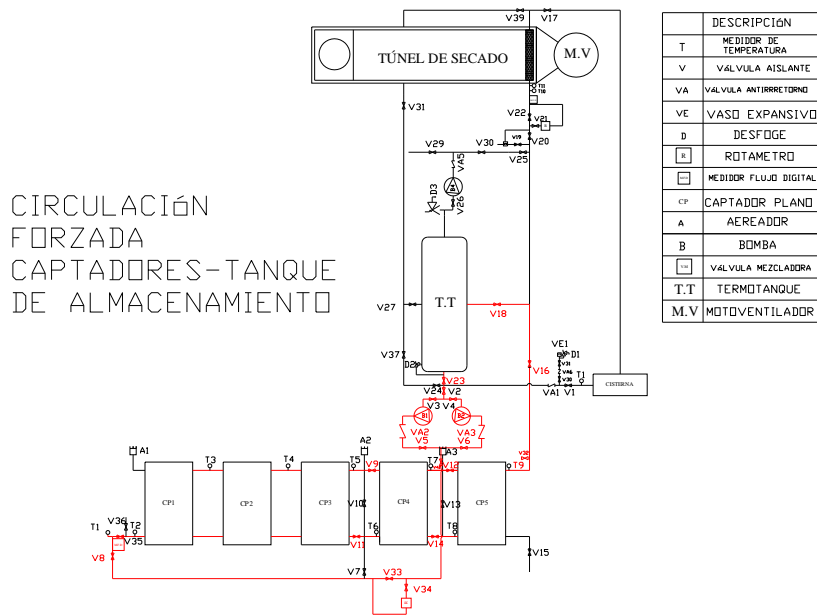


Figura 3.5. Circulación entre los captadores solares y el tanque de almacenamiento

### 3.3.3 Circuito de calentamiento directo

El circuito de calentamiento directo de aire consiste de un arreglo de dos captadores solares planos con cubierta transparente (figura 3.6), en donde el área total se ha diseñado de acuerdo a los requerimientos térmicos para el tratamiento del aire, el cual se maneja a través del mismo ventilador que utiliza el sistema indirecto. El calentamiento directo de aire se lleva a cabo en un solo paso, evitando su recirculación, debido al hecho de que el sistema no cuenta con un sistema de recuperación de la humedad en el aire, y por la consideración que las condiciones ambientales son suficientes y que la energía solar disponible permite la operación de calentamiento en un sólo paso del aire a través del captador solar. La longitud del túnel de secado corresponde al volumen de aire que se maneja así como a la radiación solar promedio necesaria para alcanzar las temperaturas de operación. El circuito de calentamiento directo de aire incluye la medición y el registro de los parámetros de operación; temperatura, humedad y flujo.



Figura 3.6. Arreglo de calentadores solares de aire.

### **3.3.3.1 Principio de funcionamiento**

Los dos captadores solares de placa plana para el calentamiento del aire están interconectados para facilitar el flujo de aire entre ellos. La radiación solar incide sobre el plato absorbedor el cual está localizado por debajo de la cubierta transparente. Bajo el absorbedor existe un conducto en donde circula el aire y este intercambia calor con el absorbedor, produciéndose su calentamiento. El aire caliente es conducido de forma forzada hacia el interior del túnel de secado, utilizando el mismo sistema de circulación del aire en el sistema de calentamiento indirecto.

### **3.3.4 Sistema solar fotovoltaico**

#### **3.3.4.1 Requerimientos de energía eléctrica**

Para poder determinar la cantidad de energía eléctrica que requiere el sistema de secado solar, se han considerado los resultados experimentales previos sobre las condiciones óptimas de la cinética de secado de arroz con cascarilla, los cuales se presentan en el capítulo IV. La tabla 3.1 presenta las condiciones requeridas óptimas para el secado del arroz. El diseño, instrumentación, instalación y evaluación experimental del sistema fotovoltaico fue realizada en un estudio previo, [17].

**Tabla 3.1 Resultados experimentales de las condiciones de trabajo para el secado de arroz.**

Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura del aire (°C)	Tiempo de secado (h)
28-31	13.0-14	2	40	4

### 3.3.4.2 Cálculo de la velocidad del aire.

Con la información experimental obtenida se puede calcular la velocidad de aire requerida en la entrada del difusor del túnel de secado antes de su acoplamiento a la turbina.

El flujo casi-unidimensional está definido como un flujo donde todas las propiedades están en función de una sola dimensión, por ejemplo 'x', donde el área transversal es variable, i.e.  $u=u(x)$ ,  $P=P(x)$ ,  $T=T(x)$  y  $A=A(x)$ . Las ecuaciones que gobiernan el flujo casi-unidimensional en estado permanente son las siguientes, como también en su forma diferencial:

Continuidad:  $\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$   
 $d(\rho u A) = 0$

Momento:  $P_1 A_1 + \rho_1 u_1^2 A_1 + \int_{A_1}^{A_2} P dA = P_2 A_2 + \rho_2 u_2^2 A_2$   
 $dP = -\rho u du$

Energía:  $h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2}$   $dh + u du = 0$

Estas expresiones pueden combinarse y obtener la relación área-velocidad:

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{du}{u}$$

Si el flujo es subsónico ( $M < 1$ ), un incremento en velocidad es proporcional a una disminución de área.

El rango de velocidad del aire que tenemos en nuestro sistema es muy por debajo de la del sonido. Para simplificar la ecuación anterior se puede tomar el valor de mach  $M^2 \approx 0$ , quedándonos únicamente:  $\frac{dA}{A} = -\frac{du}{u}$

Resolviendo:  $\int_{A_1}^{A_2} \frac{dA}{A} = -\int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{u} \Rightarrow \ln A_2 - \ln A_1 = \ln u_1 - \ln u_2 \Rightarrow \ln \frac{A_2}{A_1} = \ln \frac{u_1}{u_2}$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{u_1}{u_2} \Rightarrow u_1 A_1 = u_2 A_2$$

donde  $u_1$  es la velocidad del aire en la entrada del difusor,  $A_1$  es el área transversal de la entrada del difusor,  $u_2$  es la velocidad del aire en la salida del difusor y  $A_2$  es el área transversal de la salida del difusor.

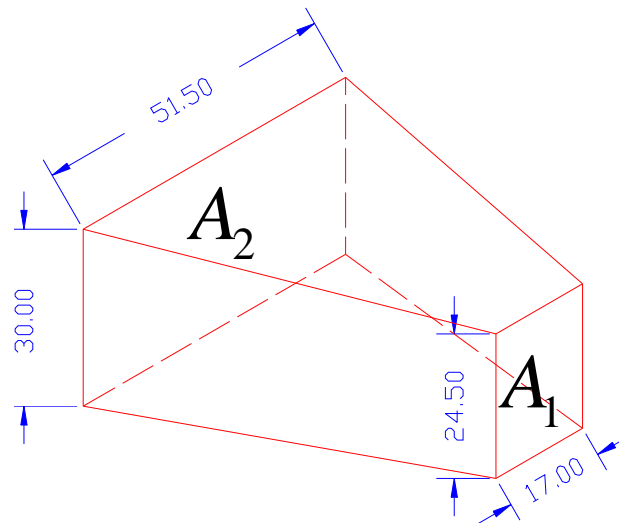


Figura 3.7. Dimensiones del difusor (cm.)

$$A_1 = (17\text{cm})(24.5\text{cm}) = 416.5\text{cm}^2$$

$$A_2 = (30\text{cm})(51.5\text{cm}) = 1545\text{cm}^2$$

Despejando  $u_1$  y sustituyendo obtenemos.

$$u_1 = \frac{u_2 A_2}{A_1} = \frac{(2\text{ m/s})(2337\text{ cm}^2)}{416.5\text{ cm}^2} = 11.22\text{ m/s}$$

Se necesita una velocidad de aire de 11.22 m/s en la salida del motor ventilador para alimentar al túnel de secado con 2 m/s durante 4 horas para poder satisfacer las condiciones de trabajo. Este resultado es solo una aproximación ya que no se considera las pérdidas por fricción dentro en difusor y la producida por los demás componentes a lo largo del túnel de secado.

### 3.3.4.3 Cálculo de la demanda de energía eléctrica

Para determinar de manera teórica la cantidad de energía eléctrica que requiere el sistema de secado solar, bajo las condiciones de trabajo establecidas, se consideran los consumos eléctricos dados por el fabricante de cada uno de los componentes eléctricos y se multiplican por el número de horas de funcionamiento y la suma total de cada uno de las consumos dará la demanda total de energía por

día de operación. En el caso de las luminarias, no se especifica su consumo eléctrico, pero se puede obtener conociendo la potencia (13 W) y dividiendo entre voltaje al que trabaja (12 V). La siguiente tabla muestra el consumo de cada componente eléctrico, las horas de funcionamiento al día, los consumos por día y el consumo total. El motor del ventilador puede operar durante el día a pesar de las variaciones de voltaje, mientras que la bomba de circulación de agua entre el termostaque y el túnel de secado y las luminarias operan a voltaje constante de 12 V. Las baterías se recargan a lo largo del día con algunos de los módulos y el sistema incluye los controladores de carga.

<b>Tabla 3.2 Consumos por día de los componentes eléctricos del túnel de secado de granos.</b>			
<b>Elemento eléctrico</b>	<b>Consumo [Amperes-h]</b>	<b>Tiempo [horas]</b>	<b>Consumo por día [Amperes]</b>
moto-ventilador (1)	15	4	60
lámparas (3)	3.25	4	13
bombas (2)	7	4	28
Total por día:			101

El consumo por día determinado de manera teórica de nuestro sistema eléctrico, fue de 101 Amperes.

#### **3.3.4.4 Propuesta del dimensionamiento.**

Para poder dimensionar de manera adecuada el sistema fotovoltaico, además de conocer la demanda diaria de cada uno de los componentes y considerando las horas disponibles de sol en la localidad de las pruebas (6 horas en Temixco, Morelos, información obtenida en la estación meteorológica y solarimétrica del CIE-UNAM en agosto 2006), se requiere establecer los diferentes modos de funcionamiento del sistema de secado.

Se proponen básicamente dos tipos de funcionamiento, uno de calentamiento directo durante el día, en donde el agua caliente se circula a través del intercambiador aire-agua, y la operación de secado se desarrolla durante el día y el otro, consistente en el calentamiento de un cierto volumen de agua y su posterior almacenamiento, para hacer circular el agua caliente a través del secador al final del día solar o algunas horas después, en este caso se requiere tanto del almacenamiento térmico como eléctrico.

##### **3.3.4.4.1 Calentamiento directo durante el día**

En este tipo de funcionamiento, la demanda eléctrica es sólo para hacer operar el motor-ventilador, ya que la bomba de circulación de agua opera con corriente alterna., De acuerdo a la tabla 3.2, el consumo total de energía eléctrica del motor-ventilador es de 60 A. En este caso, no se requiere de almacenamiento eléctrico.



#### **3.3.4.4.2 Calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico**

En este tipo de funcionamiento, la demanda eléctrica es debida al funcionamiento del motor-ventilador, de la bomba para circular el agua caliente del almacenamiento de agua caliente hacia el intercambiador agua-aire del túnel de secado y las luminarias para la operación nocturna. De acuerdo a la tabla 3.2, el consumo total de todos los componentes eléctricos es de 101 A.

#### **3.3.4.4.3 Calentamiento directo durante el día y calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico durante la noche.**

El sistema de secado solar, también esta diseñado para que opere durante 4 horas durante el día y 4 horas durante la noche, aumentando su capacidad a prácticamente el doble [17]. De acuerdo a la tabla 3.1, el consumo diurno es de 60 A y el nocturno de 110 A, haciendo un total de 170 A.

#### **3.3.4.5. Cálculo del número de módulos fotovoltaicos**

Para el sistema fotovoltaico se han seleccionado los módulos fotovoltaicos son de la marca Kyosera y cuyas características y especificaciones técnicas se describen en el anexo. Dichos módulos tienen una potencia máxima en horas pico de 80 W.

Para determinar la cantidad de módulos se tiene que dividir el total de consumo de un día entre la multiplicación de la cantidad de horas de sol en un día por la corriente que entrega cada modulo.

##### **3.3.4.5.1 Para el caso del tipo de funcionamiento diurno:**

$$n = \frac{60A}{(6)4.73A} = 2.11 \approx 2 \text{ módulos}$$

Se necesitan un mínimo de dos módulos fotovoltaicos para la operación diurna del motor-ventilador, el cual esta diseñado para operar con variaciones de voltaje, debidas a los cambios de la irradiancia solar.

##### **3.3.4.5.2. Para el caso del calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico**

$$n = \frac{110A}{(6)4.73A} \approx 3.87 \approx 4 \text{ módulos}$$

Para este tipo de funcionamiento se requieren cuatro módulos fotovoltaicos para asegurar el funcionamiento nocturno. Lo anterior por medio de almacenamiento eléctrico en baterías.

**3.3.4.5.3. Para el caso del calentamiento directo durante el día y calentamiento indirecto por medio de almacenamiento térmico y eléctrico durante la noche,** se consume la mayor cantidad de energía ya que opera 4 horas en el día y 4 horas en la noche [17].

$$n = \frac{170A}{(6)4.73A} = 5.98 \approx 6 \text{ módulos fotovoltaicos}$$

### **3.3.4.6. Cálculo del número de baterías**

Las baterías que se proponen utilizar son recargables del tipo plomo-ácido, con una capacidad de almacenamiento de 100 A cada una, a un voltaje de 12V. Las especificaciones técnicas se describen en el anexo. Este tipo de batería, por recomendación del fabricante, no se debe descargar más del 50%, requiriéndose el doble de potencia nominal instalada.

El almacenamiento tanto térmico como eléctrico se requiere para la operación nocturna del sistema con calentamiento directo, en donde se requieren 110 A, los cuales se producen por medio de 4 módulos fotovoltaicos. En este caso operan de manera simultánea, el moto-ventilador, la bomba de circulación de agua y las luminarias, por un período de cuatro horas, que son las requeridas para el secado de arroz con cáscara a una temperatura de 40°C y una velocidad del aire de 2 ms<sup>-1</sup>.

Para el almacenamiento de 110 A, si cada batería es de 100 A, se requiere de 1.1 baterías, pero como solo se puede utilizar el 50% de la descarga, entonces se requiere un mínimo de 2.2 baterías, complementándose a un número de tres para tener cierto margen de seguridad.

Estas baterías deben interconectarse en paralelo para poder ofrecer los 110 A a un voltaje constante de 12 V.

### **3.3.4.7. Descripción del sistema fotovoltaico**

El sistema solar fotovoltaico consiste en un arreglo de paneles con una capacidad instalada de 400 W, con una salida de 16.9 V y 4.73 A cada uno con una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>, baterías para aplicación solar marca LTH con sus respectivos controladores de carga y un sistema de iluminación de 40 W para la operación nocturna.

#### **3.3.4.7.1. Principio de funcionamiento**

Una parte de la energía eléctrica que generan los módulos fotovoltaicos se utiliza para alimentar el moto-ventilador que se utiliza para introducir aire al túnel de secado durante el día, y en su caso para la operación de las bombas hidráulicas que operan con corriente directa y el resto de la energía se almacenará en las baterías para utilizarla cuando la radiación solar no sea suficiente, y en la operación del resto de los componentes eléctricos durante la noche.

En la siguiente figura se representa de manera esquemática el circuito eléctrico del sistema solar fotovoltaico, en este caso utilizando cinco módulos

fotovoltaicos. En esta configuración dos módulos fotovoltaicos, MF, están conectados en paralelo y suministran de manera directa la energía eléctrica para la operación del moto-ventilador, MV y una de las bombas de circulación de agua caliente durante el día. Los tres módulos fotovoltaicos restantes están conectados a las baterías a través del controlador de carga, para la operación posterior del MV, de las bombas, así como de las luminarias en la operación nocturna.

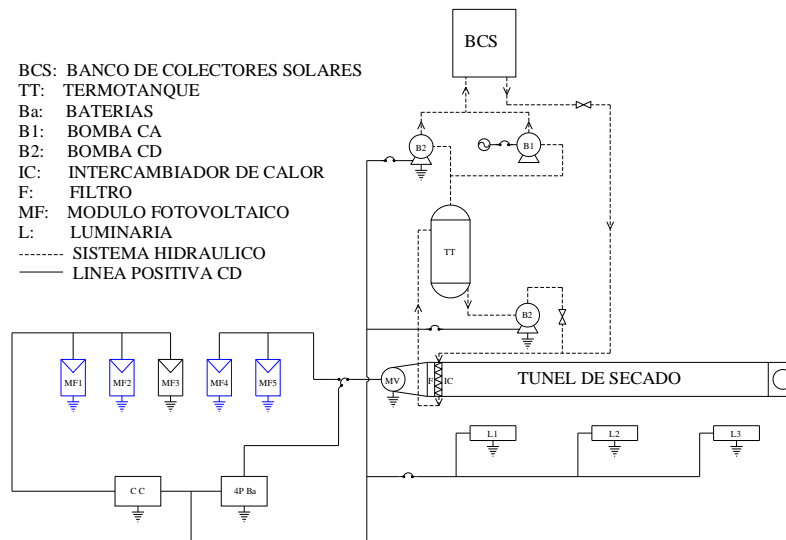


Figura 3.8. Esquema eléctrico del sistema solar fotovoltaico

### 3.3.5 Sistema de rehidratación de los granos de arroz

Con el propósito de realizar estudios de cinética de secado en granos en diferentes épocas del año en donde no correspondan a la de la cosecha, se propone la integración de un sistema de rehidratación. La cinética de rehidratación depende para cada uno de los diferentes granos de la temperatura, presión (presión reducida), y de la relación agua:grano. El sistema de rehidratación está diseñado para el tratamiento de 200 kg de producto seco y el calentamiento se lleva a cabo por medio de una resistencia eléctrica de 3000W. El volumen del tanque de tratamiento es de 400 litros y para la recirculación se utilizará el mismo termocirculador que para el sistema auxiliar de calentamiento. El sistema cuenta con sensores de temperatura.

### 3.3.6 Sistema de medición y control de parámetros de operación

En el secador solar combinado se cuenta con sistemas automáticos de adquisición y manejo de datos tanto climáticos como operacionales. En cuanto a los climáticos se registra la radiación solar global incidente sobre el plano de los captadores solares térmicos, la temperatura ambiente y la humedad.

La figura 3.9 muestra un diagrama general del sistema de calentamiento solar y su integración al túnel de secado.

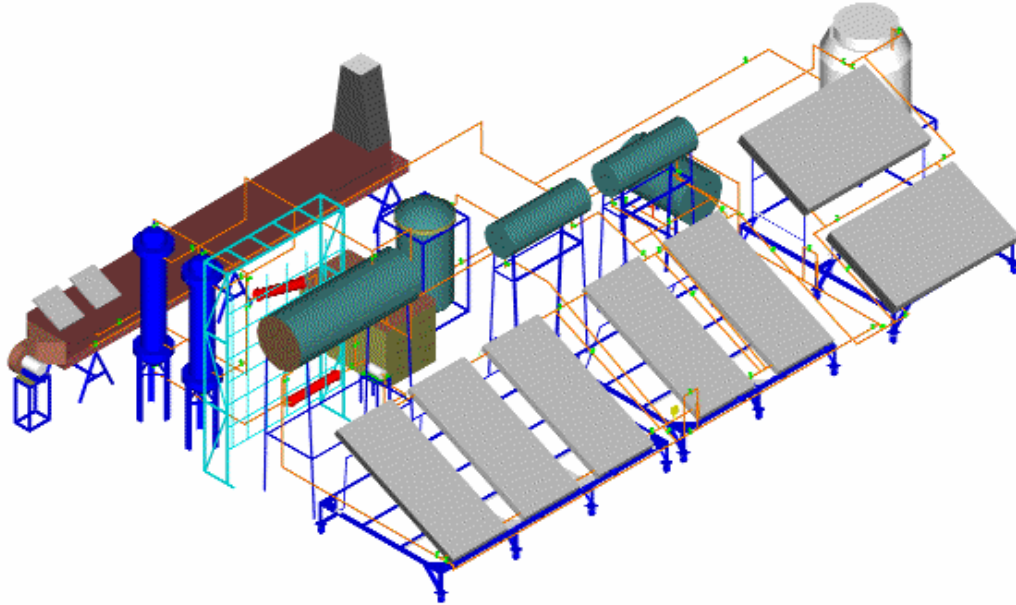


Figura 3.9. Diagrama general del sistema de calentamiento solar y su integración al túnel de secado.

## CAPÍTULO IV

# ESTUDIO EXPERIMENTAL

## **4 ESTUDIO EXPERIMENTAL**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Con base a las consideraciones de diseño, establecidas en el Capítulo III, se construyó e instrumentó un sistema de calentamiento solar indirecto de aire, SCSIA, el cual se integró a un túnel horizontal para procesar granos, en particular arroz.

El objetivo del estudio experimental es evaluar el comportamiento térmico del SCSIA, con el propósito de determinar las condiciones de operación óptimas para el acondicionamiento de un túnel para el secado de arroz, con base a los resultados obtenidos previamente sobre la cinética de secado del arroz a nivel de laboratorio.

Para el funcionamiento eléctrico del SCSIA y cubrir la demanda de energía, se adquirió un sistema fotovoltaico de acuerdo a las especificaciones establecidas en el capítulo III, y sobre el cual se desarrolló un estudio experimental para verificar su comportamiento y adecuación a la operación del túnel de secado.

Los límites del presente estudio experimental abarcan la evaluación térmica del SCSIA, sin producto así como un estudio preliminar con carga de producto, en este caso con arroz con cascarilla, el cual se humidificó para su procesamiento, según el procedimiento descrito. Lo anterior para adquirir información sobre el secado de grano, y establecer algunos criterios de procedimiento para el futuro secado del producto recién cosechado.

### **4.2 ESTUDIOS EXPERIMENTALES PREVIOS**

Con el propósito de conocer las condiciones de operación óptimas para el secado de arroz, se realizaron dos estudios experimentales en el Laboratorio de Secado de la Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor del Centro de Investigación en Energía de la UNAM. Los estudios fueron los siguientes: a) Análisis de la cinética de secado de arroz con cascarilla (palay) de la variedad Morelos, el cual fue desarrollado por la I. Q. Sandra Patricia Escobar Osegura, egresada del Instituto Tecnológico de Tapachula, Chiapas, dentro sus actividades de residencia profesional, b) Estudio experimental del dispositivo de laboratorio para la determinación de las condiciones óptimas de proceso de secado de granos alimenticios: caso particular, el arroz palay, realizado por Marlene Verdugo Dardon, egresada del Instituto Tecnológico de Tapachula, Chiapas, dentro sus actividades de residencia profesional y c) Evaluación experimental e integración de un sistema fotovoltaico para la operación de un sistema solar termohidrónico para el secado de granos, el cual fue llevado a cabo como proyecto de tesis, por el I.M Víctor Manuel Cadena Cedillo, en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM, febrero 2007.

#### **4.2.1 Análisis de la cinética de secado de arroz con cascarilla (palay) de la variedad Morelos, [18]**

El objetivo de este estudio experimental fue el análisis del comportamiento de la pérdida de peso del arroz palay durante el proceso de secado a diferentes condiciones de temperatura.

En el estudio se utilizó grano almacenado, con una humedad promedio que osciló aproximadamente entre 10 y 11% de humedad en base seca. Para su hidratación, se utilizó un baño térmico a una temperatura de 65 °C, para lograr una humedad en el grano cercana a la que se obtiene de manera natural una vez cosechado, siendo el dominio entre 28 y 30% en base húmeda.

El estudio de la cinética se llevó a cabo a tres diferentes niveles de temperatura: 40, 50 y 60 °C. El período de pruebas se realizó del 24 al 28 de julio de 2006, en el laboratorio de secado solar, ubicado en la Plataforma Solar. El procedimiento, la metodología y la rutina experimental se describen en detalle en el reporte técnico respectivo, [1].

Se tomaron 9 muestras después de la hidratación, con los siguientes contenidos de humedad inicial: 30.83%, 31.33%, 30.08%, 29.89%, 29.86%, 29.85%, 29.84%, 28.95 % y 28.91% respectivamente para cada una de las muestras.

El programa de temperaturas se estableció de la siguiente manera: 50 °C, para las muestras 1, 2 y 3; 40 °C para las muestras 4, 5 y 6 y finalmente 60 °C para las muestras 7, 8 y 9, respectivamente. En cuanto al tiempo de secado, se establecieron 4 horas para las muestras 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y 3 horas para las muestras 7, 8 y 9, respectivamente.

La metodología establecida para la determinación de la cinética de secado se compone de: a) recepción y selección de materia prima, b) determinación de la humedad inicial del grano, (seco), hidratación a una temperatura de 65 °C, c) deshidratación del grano en la estufa a temperatura controlada, determinación de la humedad final y d) almacenamiento. Los resultados experimentales están representados en las tablas 1, 2 y 3 en donde se presentan la pérdida de peso de las muestras de arroz con diferentes humedades iniciales para cada temperatura establecida de 40, 50 y 60 °C, respectivamente

Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 representan las evoluciones de la pérdida de peso de las muestras de arroz con diferentes humedades iniciales para cada temperatura establecida de 40, 50 y 60 °C, respectivamente.

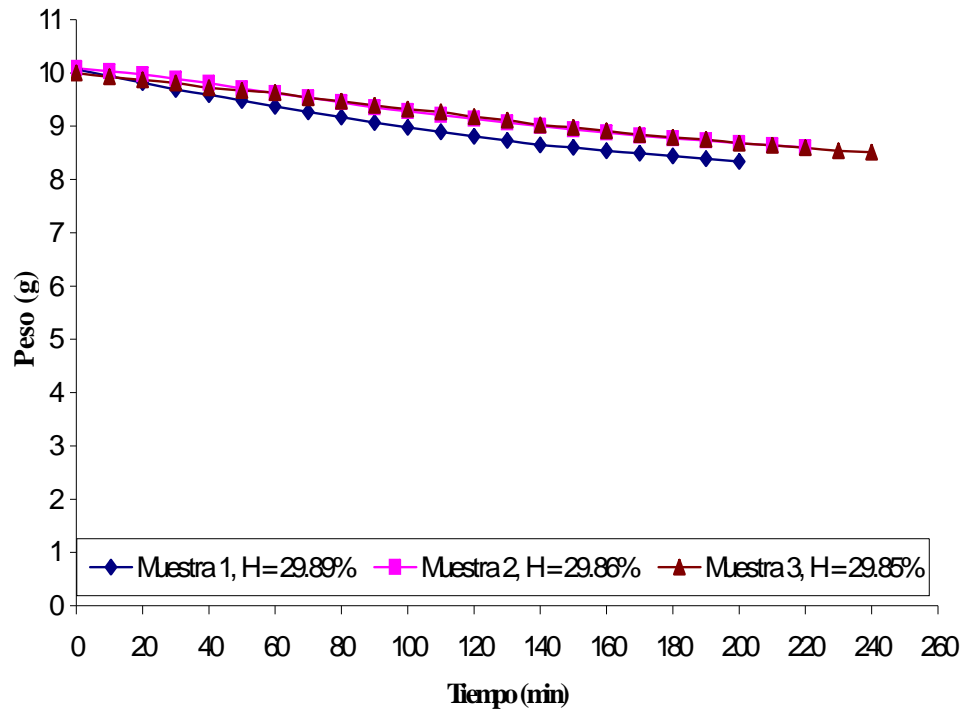


Figura 4.1 Deshidratación del arroz a 40 °C

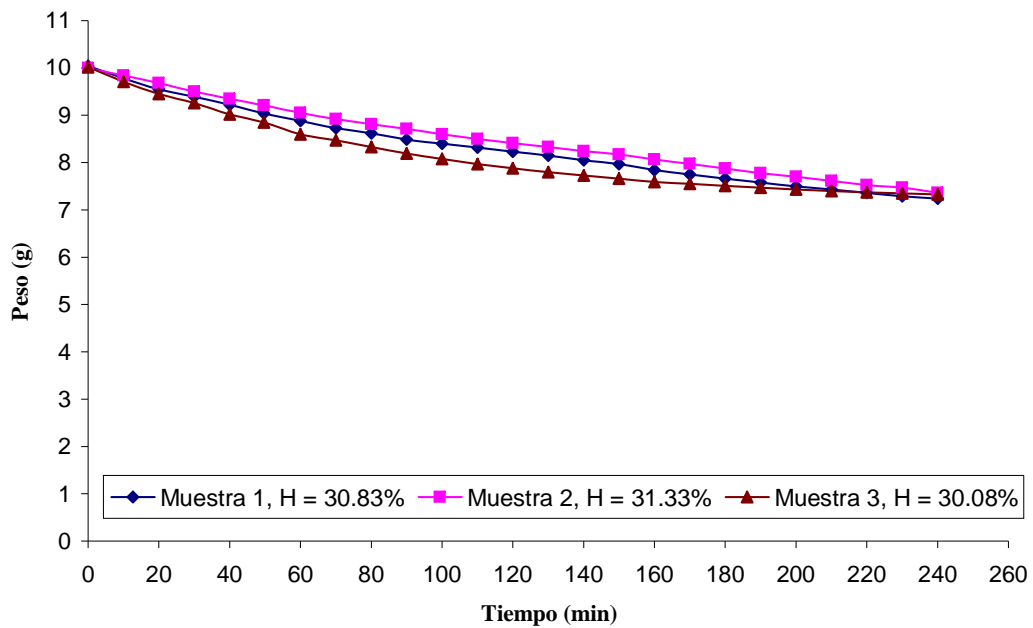


Figura 4.2 Deshidratación del arroz a 50 °C



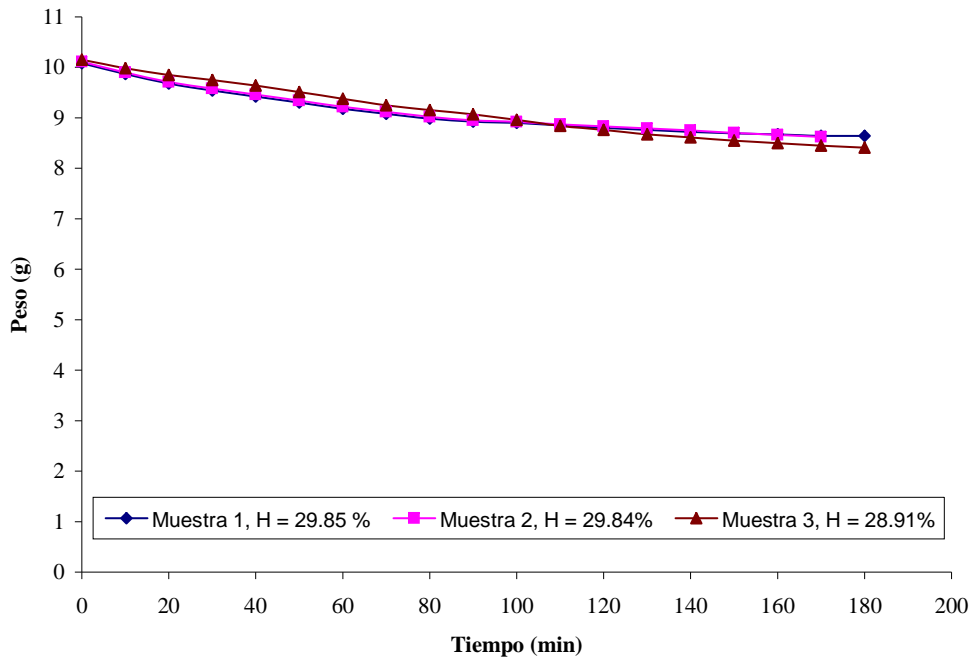


Figura 4.3. Deshidratación del arroz a 60 °C

## 4.2.2 Estudio experimental del dispositivo de laboratorio para la determinación de las condiciones óptimas de proceso de secado de granos alimenticios: caso particular, el arroz palay [19].

### 4.2.2.1 Introducción

El objetivo de este estudio fue el diseño, construcción, instrumentación de un equipo que permitiera la determinación experimental del espesor adecuado de la cama de granos a secar (capa límite), bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad del aire, con el objeto de obtener información sobre las condiciones óptimas del proceso del secado de arroz. El procedimiento, la metodología y la rutina experimental se describen en detalle en el reporte técnico respectivo, [19].

En este equipo se controló la temperatura y la velocidad de entrada del aire y se hizo fluir éste hacia una charola contenedora, en donde se podía controlar el espesor del grano. Con este sistema se puede establecer cualquier condición del aire entre 30 y 50 °C y velocidades de hasta 2 m/s, con espesores de grano hasta de 20 cm.

Se determinó la humedad contenida en el grano (base seca) en diferentes puntos de la charola con el objeto de establecer una distribución estadística de la misma. Además de los parámetros anteriores se determinó la humedad relativa del aire a la entrada y la salida del equipo. Gracias a este equipo fue posible determinar las condiciones óptimas para el secado de arroz cáscara. Cabe mencionar que este dispositivo puede utilizarse para otros tipos de productos a

secar y obtener la información experimental a escala laboratorio sobre las condiciones óptimas para el secado.

El equipo experimental consiste de una cámara de secado, un difusor de aire, un sistema de circulación de aire, un sistema de calentamiento, un sistema de potencia y un sistema de medición de los diferentes parámetros. La figura 4.4, muestra el equipo experimental utilizado.

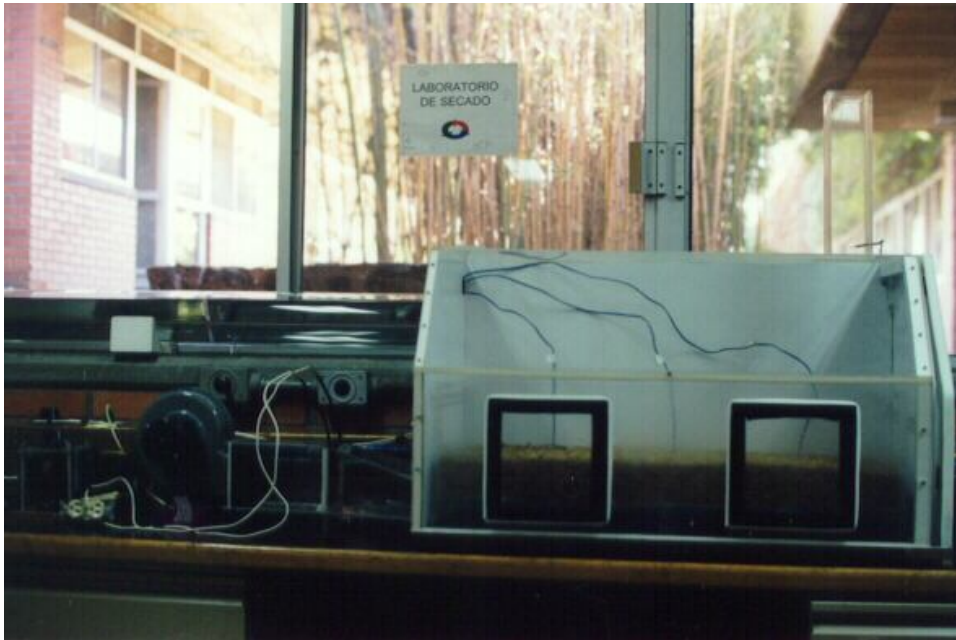


Figura 4.4 Equipo experimental para la determinación de las propiedades óptimas de secado de granos

#### 4.2.2.2 Resultados experimentales

En todos los casos se aplicó la máxima velocidad promedio de aire obtenida en la cámara, de  $2 \text{ ms}^{-1}$  y la temperatura osciló entre 37 y 41 °C. Las humedades iniciales del grano de arroz variaron entre un 27.8 y 31.9% y se obtuvieron humedades finales entre 12.3 y 13.7%, dentro del dominio recomendado para su almacenamiento, en este caso a partir de una capa de 6 cm. se tomaron dos muestras en dos puntos distantes de la cámara para obtener un valor promedio de la humedad final.

La figura 4.5, muestra un ejemplo de la pérdida de peso de dos puntos de muestreo para una cama de arroz de 6 cm. de alto, en donde se obtuvo un tiempo de secado de 4.15 h, con una velocidad relativa de secado entre 4.04 y 4.16 grados de humedad por hora.

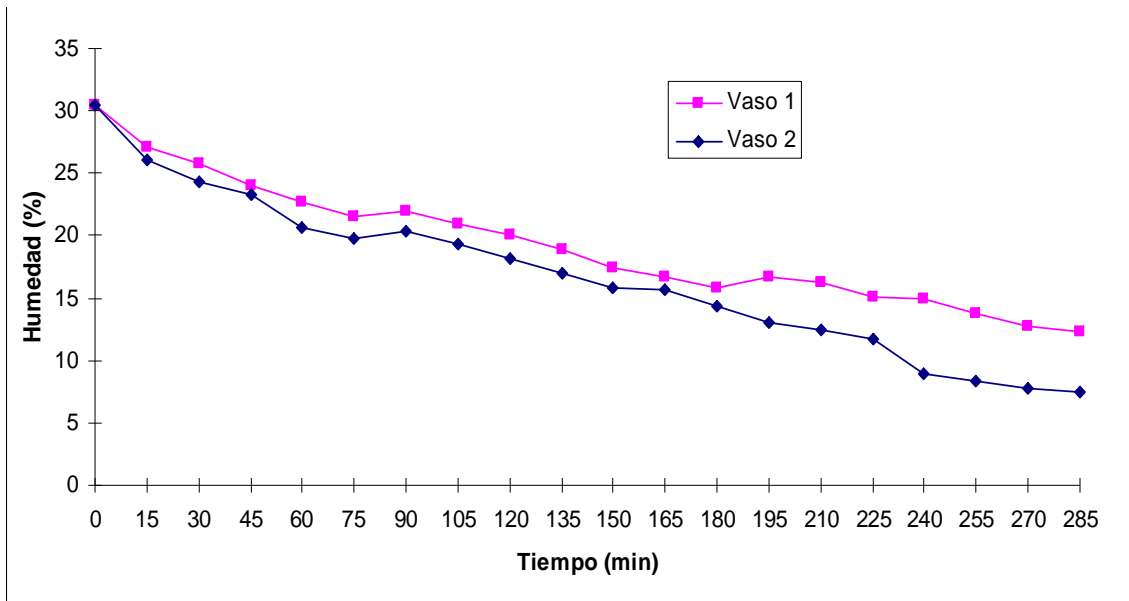


Figura 4.5. Pérdida de peso de una cama de arroz de 6 cm. bajo las condiciones controladas de la cámara de secado experimental de laboratorio

Los resultados experimentales están resumidos en la tabla 4.1, en donde se presentan los tiempos de secado para diferentes espesores de grano de arroz, y la diferencia en contenido de humedad en el grano. Las diferencias se deben a los contenidos de humedad en cada una de las muestras. En estos primeros resultados experimentales se constata que a medida que el grano está menos húmedo, la velocidad de secado disminuye.

**Tabla 4.1. Resumen de los resultados experimentales obtenidos en la cámara de secado de laboratorio**

Espesor (cm)	Humedad Inicial (%)	Humedad Final (%)		Tiempo de secado, (h)
		Punto 1	Punto 2	
2	28.1	13.1		4:30
3.5	27.8	13.2		3:45
6	30.5	13.7	12.7	4:15
8	31.9	13.5	12.5	3:30
10	31.2	13.5	12.3	4:15

### **4.2.3 Evaluación experimental e integración de un sistema fotovoltaico para la operación de un sistema solar termohidrónico para el secado de granos [17].**

#### **4.2.3.1 Introducción**

El objetivo de este estudio fue el diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica al sistema de secado solar termohidrónico, con base a los distintos modos de funcionamiento del sistema, es decir para las operaciones diurna, nocturna y diurna y nocturna.

Para lo anterior se hizo un análisis experimental de las propiedades eléctricas de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico, así como los resultados de su integración en el túnel de secado.

Para la operación eléctrica del túnel de secado, se propuso la instalación, instrumentación y evaluación de un sistema fotovoltaico, cuyo diseño fue descrito en el capítulo III. El sistema fotovoltaico tiene una potencia instalada de 400 W, proporcionando un suministro diario de energía de 2500Wh, dependiendo de la intensidad de la radiación solar, así como de un almacenamiento eléctrico de 200 Amperes, con un sistema automático de control de carga, para la operación nocturna de los componentes eléctricos, como el (moto-ventilador y 3 luminarias) y un motor de corriente directa de 100W acoplado a una difusor de aire tipo jaula de ardilla, así como un medidor de velocidad y temperatura del aire. También se previó, la operación de una bomba para la circulación del agua caliente del termostanque al intercambiador de calor, agua-aire, en caso de fallas en el suministro eléctrico de la red.

Los cinco módulos fotovoltaicos constituidos con celdas de silicio policristalino, con una superficie de captación solar cada uno de 0.64 m<sup>2</sup>, tiene una potencia nominal cada uno de 80W, brindando a las condiciones normalizadas (a una radiación solar de 1000W/m<sup>2</sup>, una masa de aire de 1.5 y una T = 25 °C) a una potencia pico nominal, PPN, una tensión de 16.7 V y una corriente de 4.73 A. En esta actividad se diseñó y construyó una estructura para soportar los módulos, el sistema de control y el cableado para la distribución de la corriente eléctrica.

#### **4.2.3.2 Resultados experimentales**

El ventilador opera con un motor de corriente directa, con una potencia de ¼ HP, a 1800 rpm, y con un consumo nominal de 12VCD y 21 A. Su estudio consistió en evaluar el funcionamiento de la turbina la cual opera directamente a través de los módulos o indirectamente por medio de las baterías, dependiendo de la opción que se elija. Para conocer el rendimiento del motor es necesario evaluar sus características eléctricas, y para esto se determinó su curva I-V utilizando una fuente de potencia variable, variando el voltaje y la corriente que se suministra al motor.

En la figura 4.6, están representadas las evoluciones de la corriente eléctrica, así como la velocidad del aire a la salida de la turbina en función del voltaje aplicado. En esta figura se puede observar que el dominio de la velocidad del aire que se obtiene oscila entre 2 y 14.5 m/s aproximadamente, siendo esto

una buena velocidad en el sistema para poder satisfacer las condiciones de trabajo.

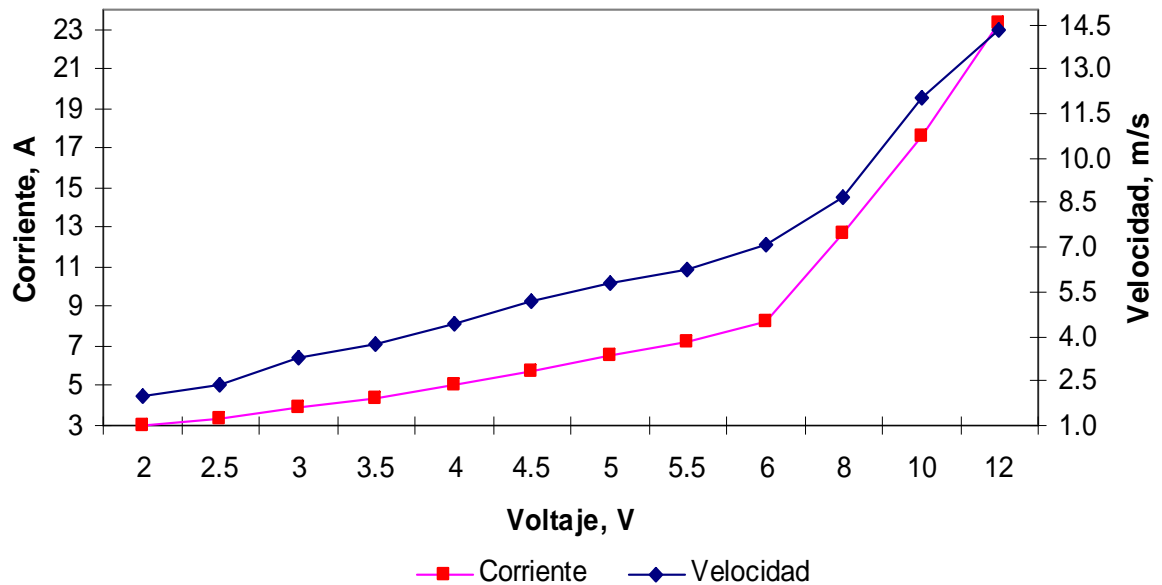


Figura 4.6. Curvas de corriente consumida por el moto-ventilador y velocidad del aire a la salida del ventilador, en función del voltaje.

La figura 4.7, representa las curvas características de los módulos fotovoltaicos, en donde se ha integrado la curva característica del motor, así como de la variación de la velocidad del aire a la salida del moto-ventilador. Esta representación es de gran utilidad ya que permite conocer las condiciones de funcionamiento del motor cuando esta conectado a los módulos fotovoltaicos.

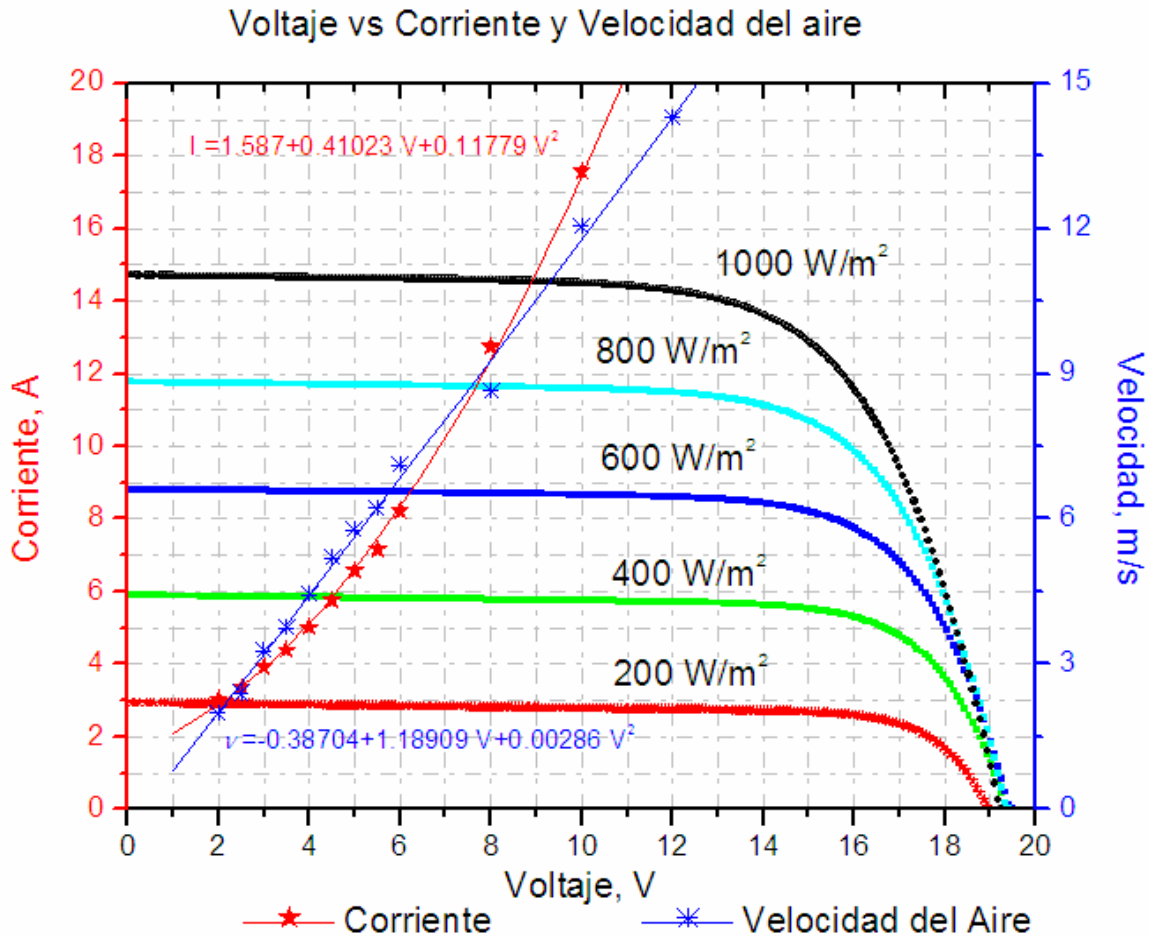


Figura 4.7 Curvas características del moto-ventilador y los módulos fotovoltaicos, y la velocidad del aire a la salida del ventilador, en función de la intensidad de la radiación solar.

La figura 4.7, nos permite conocer la relación entre la velocidad del aire y la radiación solar. Así que podemos prever las variaciones de la velocidad bajo la influencia de la nubosidad o de algún otro parámetro que dificulte la incidencia de los rayos solares en los módulos fotovoltaicos.

#### 4.2.3.2.1 Integración del moto-ventilador a los módulos.

Es necesario conocer el comportamiento de operación del motor en función de los parámetros climáticos que pudieran afectar el funcionamiento del sistema fotovoltaico y con esto poder determinar si se satisface o no la demanda energética a lo largo del día. Para lograr lo anterior el motor ventilador se conectó directamente a tres módulos conectados en paralelo para conocer el comportamiento del sistema durante el transcurso del día, en horas de sol. Durante la prueba, se midieron tanto la velocidad del aire a la salida del ventilador y como la variación de la irradiancia solar.

En la figura 4.8, se muestra la variación de la velocidad a lo largo del día, influenciada ésta por los factores climáticos. La velocidad máxima obtenida fue de 9.5 m/s aproximadamente poco después de las 14:20 horas; el rango de velocidad fue desde 3 a 9.5 m/s con variaciones considerables después de las 13:40 horas.

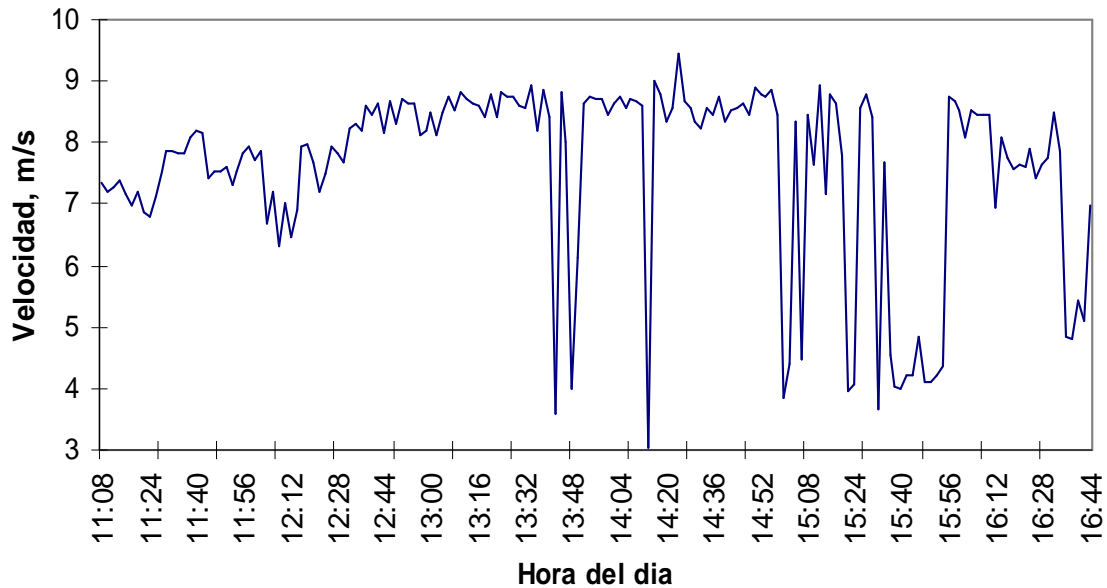


Figura 4.8 Velocidad del aire a la salida del moto-ventilador alimentado con los módulos fotovoltaicos en función del tiempo.

#### 4.2.3.2.2 Acoplamiento del moto-ventilador al túnel de secado

En la figura 4.9 se puede observar que la variación de la velocidad del aire a la entrada del túnel no es grande a lo largo del día y que se encuentra dentro del dominio requerido para su operación, que va de 1 a 2.1 m/s.

### Velocidad del aire a la entrada del túnel de secado

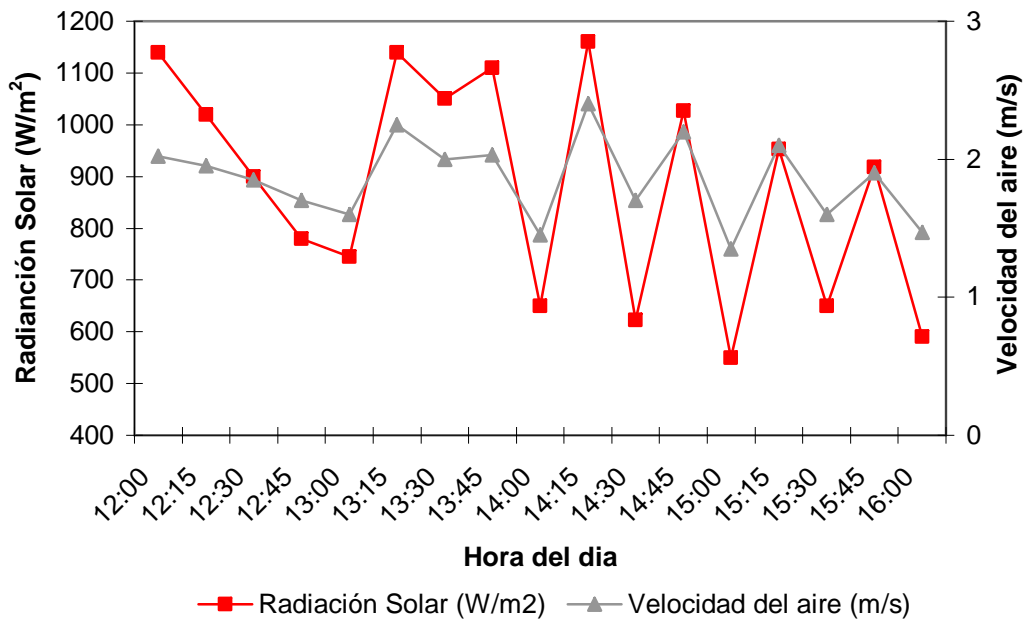


Figura 4.9. Variación en el comportamiento de la radiación solar y de la velocidad del aire a la salida del moto-ventilador acoplado en el túnel, en función del tiempo.

Para conocer los parámetros necesarios para operar el secador bajo condiciones óptimas de diseño, se realizó una nueva prueba, en esta ocasión alimentando la energía por medio de una fuente de poder en lugar de los módulos, siguiendo la metodología utilizada para obtener la curva característica V-I y la velocidad del aire, con la diferencia que ahora se tiene el moto-ventilador acoplado al túnel de secado.

Estos resultados experimentales están representados en la figura 4.10.



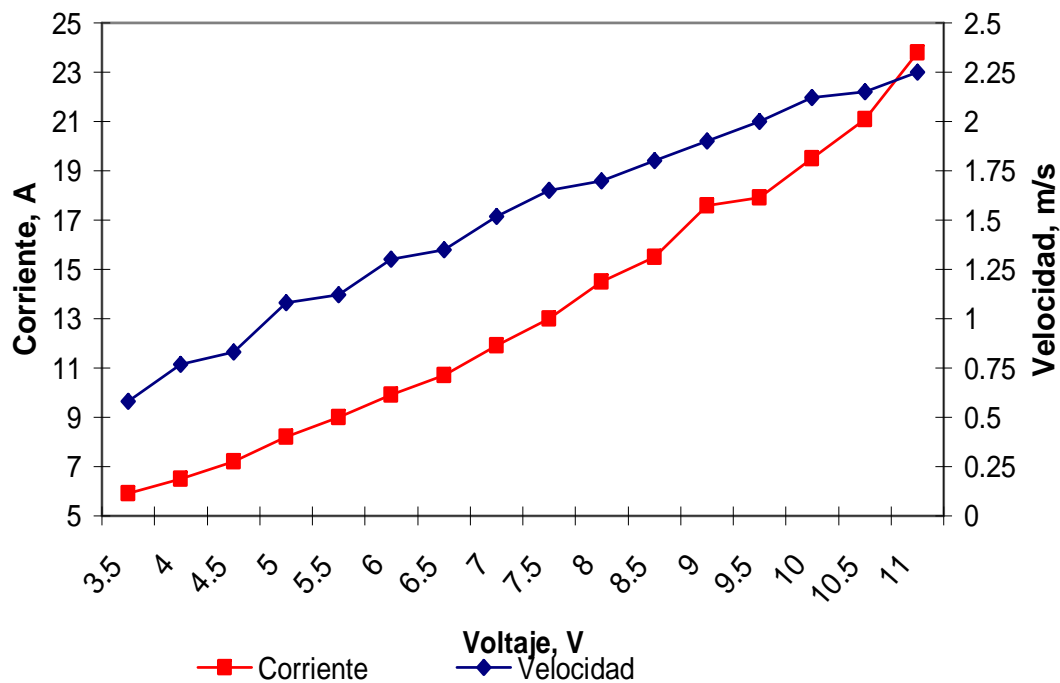


Figura 4.10. Representación de la curva característica corriente-voltaje del motor-ventilador acoplado en el túnel de secado y la velocidad del aire obtenida a la entrada del mismo.

Los resultados experimentales demostraron que el diseño fotovoltaico fue adecuado para la operación del túnel de secado en sus diferentes tipos de funcionamiento, sin embargo, la caída de velocidad es muy alta entre la salida del motor y la entrada al túnel, en parte por la ubicación del intercambiador de calor, pero esto es debido fundamentalmente a que, a causa de la diferencia de secciones de flujo de la salida del ventilador y la del túnel, la longitud del difusor es muy corta, por lo que en un diseño futuro se deberá tener una longitud de por lo menos el doble de lo que tiene actualmente. Además se considera que el consumo eléctrico del motor es alto, debiéndose reemplazar por uno más eficiente.

### 4.3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR INDIRECTO DE AIRE PARA SU ACOPLAMIENTO A UN TÚNEL DE SECADO DE GRANOS.

#### 4.3.1 Descripción general

El objetivo del estudio experimental es analizar el comportamiento del túnel de secado operando con el sistema de calentamiento indirecto de aire, con y sin producto a tratar.

Para el estudio del comportamiento térmico del túnel de secado, se requiere mantener un flujo constante de agua caliente a través del intercambiador de calor para poder proveer al aire con el calor necesario (40 °C en promedio) para remover la humedad del grano en el interior del túnel de secado. Para la experimentación se circuló el agua caliente a diferentes flujos del agua caliente a través del campo de captadores solares y del intercambiador de calor aire-agua: 40, 50 y 60 l/h. Las pruebas con producto se hicieron con un flujo de 50 l/h.

La velocidad del aire debe de ser mayor de 2.0 m/s, con el objeto de asegurar una remoción óptima del vapor húmedo. Para poder realizar el análisis del comportamiento del secador solar, se requiere obtener información sobre los parámetros operacionales en el circuito hidráulico de calentamiento solar: temperatura y flujo del agua circulante y al interior del túnel de secado, tales como: temperatura, humedad y velocidad del aire y contenido de humedad en el grano, así como la medición de los parámetros climáticos como: la radiación solar incidente en el plano de los captadores solares, la temperatura y humedad ambiente.

En el circuito de calentamiento solar se instalaron diez sensores de temperatura tipo termopar clase T, en diferentes puntos del circuito: entrada y salida del campo de captadores solares, incluyendo entradas y salidas en cada uno de los cinco captadores solares, a la entrada y salida del intercambiador de calor y a lo largo del interior del túnel en cada una de las seis secciones del área de secado. Para la medición del flujo de agua se instalaron rotámetros para su control, tanto en la entrada del sistema solar como a la entrada del intercambiador.

En el interior del túnel de secado, se instalaron 36 de sensores de temperatura, dos en cada una de las charolas, con el propósito de medir el comportamiento de la temperatura en cada una de las secciones a todo lo largo del túnel. Todos los sensores se conectaron al sistema de adquisición de datos para estarlos monitoreando durante todo el tiempo de la prueba.

En la entrada del túnel inmediatamente después del intercambiador de calor se instaló un anemómetro para registrar la velocidad del aire a la entrada de la cámara de secado. También se colocó un medidor de humedad en el interior, este con el fin de registrar el decremento en la humedad del aire durante el periodo de prueba. Estos dos instrumentos tienen su propio programa de adquisición de datos.

La radiación solar total incidente se midió con un piranómetro colocado en el mismo plano que los captadores solares. La temperatura ambiente se midió también con un sensor colocado cerca del túnel en un lugar sombreado para no afectar la lectura. La figura 4.11 presenta de manera esquemática la ubicación de los diferentes sensores en el circuito de calentamiento solar. Las especificaciones técnicas de la instrumentación utilizada para el desarrollo del estudio experimental se describen en el anexo I.

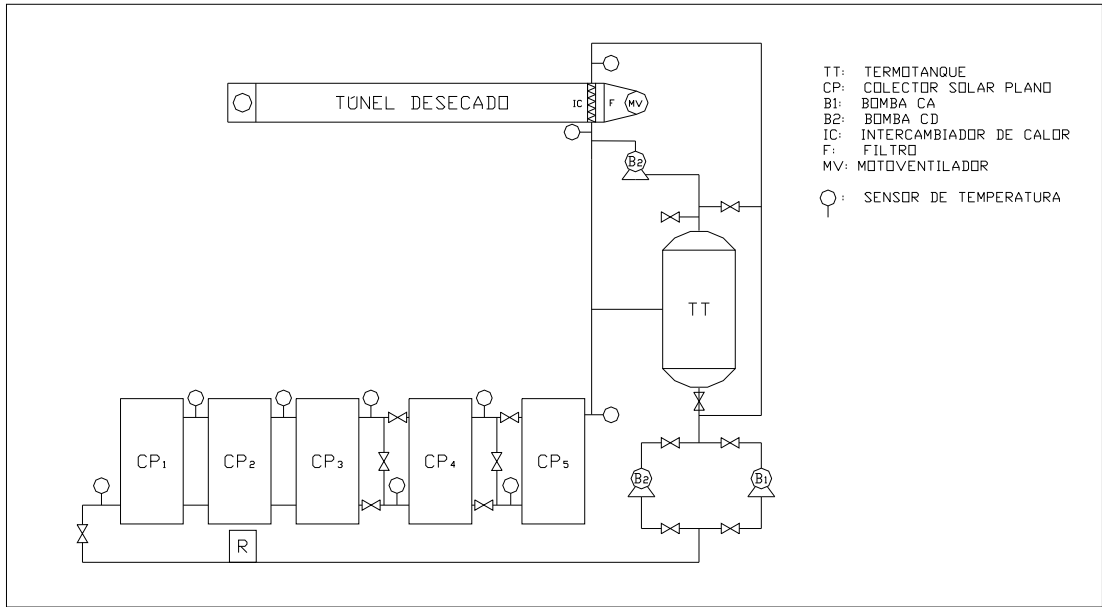


Figura 4.11. Diagrama de la colocación de los sensores de temperatura en el circuito hidráulico

El programa de adquisición de datos para la captura de todos los parámetros operacionales y climáticos se realizó por medio del programa HP-VEE versión 5.01. La figura 4.12, muestra un ejemplo del programa utilizado y su visualización en la pantalla de la computadora.

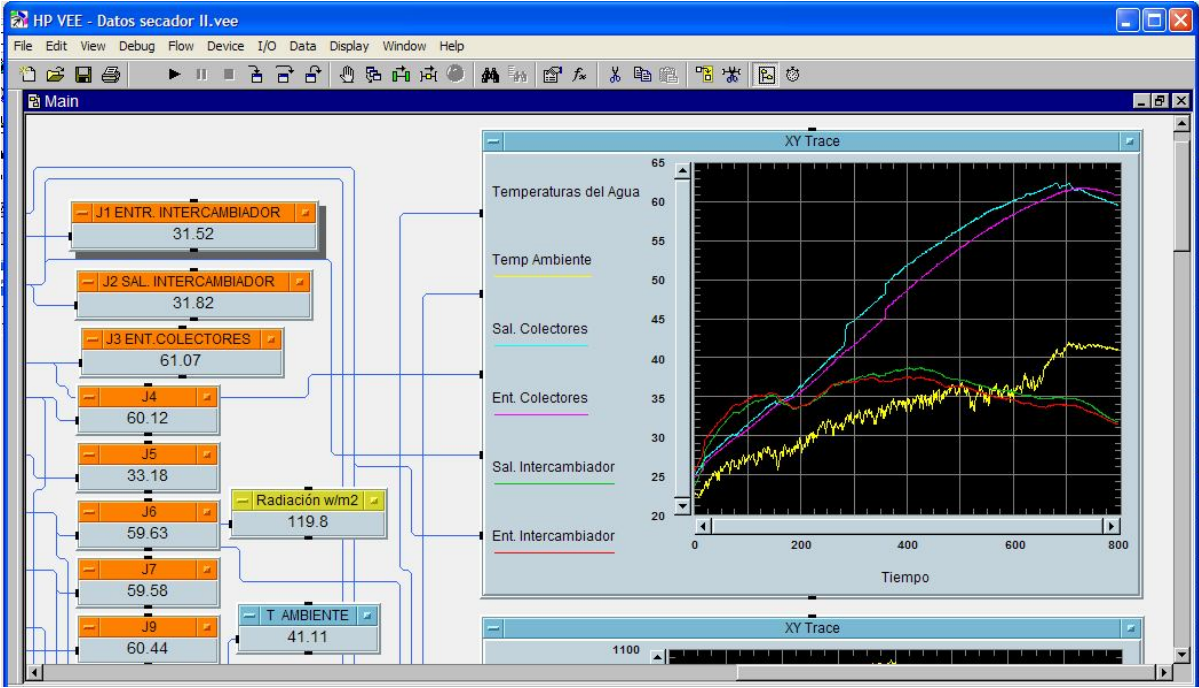


Figura 4.12. Programa de adquisición de datos HP-VEE.

### **4.3.2. Estudio experimental del comportamiento del túnel sin producto**

#### **4.3.2.1 Procedimiento general**

- a) Se colocan los sensores de velocidad del aire a la entrada del secador y el medidor de humedad en el interior del túnel.
- b) Se conectan los sensores a la computadora y se inician los programas de captación de datos tanto del anemómetro como del higrómetro.
- c) Se verifica el funcionamiento del programa de adquisición de datos para los sensores de temperatura y radiación solar y se le asigna un nombre a la corrida experimental.
- d) Se acciona la bomba hidráulica y se verifica el flujo de agua pre establecido por medio de los rotámetros.
- e) Se inician los programas de adquisición de datos viendo que todo funcione correctamente y se da la instrucción de guardar los datos en cada uno de los diferentes programas.
- f) Las pruebas se inician alrededor de las 9:00 h y se terminan aproximadamente a las 18:00h (hora local).
- g) Una vez que se concluye la prueba se apagan los programas de adquisición y se guardan los datos para su análisis posterior.

### **4.3.3. Estudio experimental del comportamiento del túnel con producto**

#### **4.3.3.1 Procedimiento general**

- a) Como las pruebas se hicieron fuera de la temporada de cosecha del arroz, antes de iniciar la prueba de secado se tiene que hidratar el grano de arroz, con características de almacenamiento. Este arroz fue proporcionado por la empresa ARMOSA de Puente de Ixtla, Morelos. Se colocaron 150 kg de arroz seco para su hidratación a una humedad final entre el 30 y 35% de humedad en base húmeda, en un recipiente especialmente diseñado para este proceso. El arroz se introduce en el re-hidratador alrededor de las 19:00 y se extrae a las 8:00 h del día siguiente. Posteriormente se deja escurrir, sobre una malla metálica por cerca de una hora, se mide su humedad inicial promedio, utilizando varias muestras y se reparte todo el contenido de manera equitativa entre todas las charolas, las cuales se van introduciendo dentro del túnel de secado.
- b) Se colocan los sensores de velocidad del aire a la entrada del secador y el medidor de humedad en el interior del túnel.
- c) Se verifica que el programa de adquisición de datos para las temperaturas y radiación solar y se le da el nombre de la prueba que se estará realizando.
- d) Se enciende la bomba hidráulica y se verifica el flujo de agua con los rotámetros
- e) Se inician los programas de adquisición de datos, para verificar su correcto funcionamiento y se da la instrucción de guardar los datos a cada uno de los programas de adquisición, los datos se guardan cada 30 segundos.

- f) Se toma una muestra de arroz de 200 gr. de cada una de las charolas para medir el contenido de humedad en el grano, utilizando un analizador de humedad electrónico, el cual está calibrado para diferentes tipos de granos. Este medidor de humedad no es destructivo, por lo que se puede registrar la pérdida de humedad a lo largo de toda la prueba. Estas muestras se toman cada hora.
- g) Cuando el arroz alcanza una humedad entre 12 y 13 % se detiene la prueba y se almacenan los datos para su análisis posterior.
- h) Se procede a parar todos los equipos.

## **4.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES**

### **4.4.1. Acondicionamiento del túnel de secado con el sistema de calentamiento solar indirecto de aire.**

#### **4.4.1.1. Consideraciones generales**

Los resultados experimentales del acondicionamiento del túnel de secado, están representados en series de gráficas, en función del flujo de agua que circula a través del circuito hidráulico correspondiente. En este estudio experimental se determinaron los flujos de agua correspondientes a 40, 50 y 60 litros por hora. Esta selección está basada en las experiencias obtenidas por los fabricantes de equipo solar, en función de las eficiencias alcanzadas y el nivel de temperatura alcanzado, en este caso en un dominio de temperaturas entre 40 y 45 °C, valores muy cercanos a la temperatura de diseño del secador solar.

En este caso el circuito hidráulico está localizado entre el campo de captadores solares y el intercambiador aire-agua, ubicado en el interior del túnel. El flujo de agua es el mismo que circula en el sistema solar que en el sistema de intercambio de calor, sólo se consideran las variaciones por las caídas de presión del circuito. Los resultados muestran la evolución de las temperaturas a la entrada y a la salida del sistema solar y a la entrada y a la salida del intercambiador de calor. Los resultados representados en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15, muestran la evolución de las temperaturas a la entrada y salida del sistema de calentamiento solar, en función de la radiación solar incidente, para cada uno de los flujos de agua establecidos.

Las temperaturas de salida del sistema solar son prácticamente las mismas que las de la entrada al intercambiador y las temperaturas de salida del intercambiador son prácticamente las mismas que las de la entrada al sistema solar. En general se puede observar, la fuerte dependencia de las condiciones de operación con relación a la radiación solar.

Si no hay circulación de aire a través del intercambiador, las cuatro temperaturas son prácticamente las mismas. A medida que la velocidad del aire aumenta, por efecto de un mayor voltaje en el motor, debido a su vez al aumento en la intensidad de la energía solar incidente, se aprecia una mayor diferencia entre las temperaturas en el intercambiador de calor. Para lograr un incremento de

temperaturas en el aire se requiere un dominio de irradiancia solar entre 650 y 800 W/m<sup>2</sup>.

Con relación al comportamiento de las condiciones de operación al interior del túnel de secado, las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 representan las variaciones de las velocidades del aire y las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 las variaciones de la humedad relativa del aire, ambas en función de la radiación solar, para los diferentes días de prueba, para los flujos de agua considerados. Las evoluciones de las temperaturas y de la velocidad del aire al interior del túnel están representadas en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25, para cada uno de los flujos de agua establecidos. Los resultados experimentales del calentamiento de agua y de aire al interior del túnel, reportados para cada uno de los flujos, se realizaron el mismo día de prueba.

#### **4.4.1.2. Variación de la temperatura del agua.**

Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15, representan las variaciones de las temperaturas del agua de calentamiento para los tres diferentes flujos: 40, 50 y 60 l/h respectivamente.

En la figura 4.13, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 40 l/h. La prueba inició a las 10:00 h, con una temperatura inicial del agua que osciló entre 29 y 30 °C y alcanzó un valor máximo entre 53 y 54 °C, cerca de las 14:00 h. con una radiación cercana a los 1000 W/m<sup>2</sup>. La condición establecida de diseño de 40 °C, se alcanzó una hora después de haber iniciado la prueba, manteniéndose por arriba de este valor prácticamente todo el día. En esta figura, se observa la fuerte dependencia de las condiciones de operación con respecto a la radiación solar, en donde a partir de las 11:00 h y hasta las 14:00 hubo extracción de calor en el intercambiador por parte del aire, lográndose un incremento promedio de temperaturas entre 3 y 4 °C. A partir de las 14:20 aproximadamente, la radiación solar disminuyó bruscamente hasta valores que oscilaron entre 400 y 200 W/m<sup>2</sup> y cesó la extracción de calor.

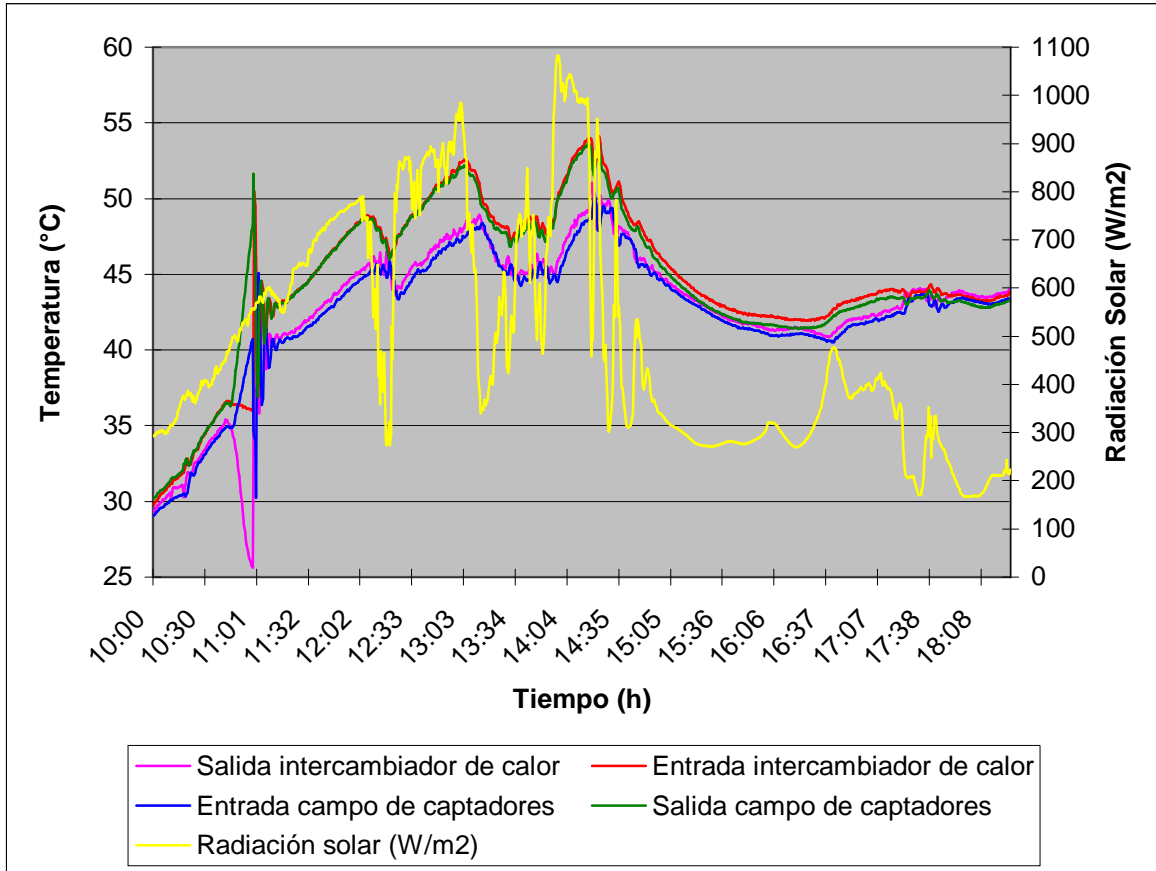


Figura 4.13 Variación de la temperatura del agua a un flujo de 40 l/h en función de la radiación solar.

En la figura 4.14, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 50 l/h. A pesar de ser un flujo mayor de agua, se obtuvo un incremento mayor de temperaturas que en el caso anterior, debido básicamente a las mejores condiciones de radiación solar. Se puede apreciar una variación constante entre las condiciones de entrada y salida del intercambiador, la cual fue aumentando hasta un incremento de cerca de 4 °C. Se mantuvo una temperatura entre 50 y 55 °C en el período entre las 12:00 y 17:00 h aproximadamente, descendiendo hasta 46 °C a las 17:30 h. Como en el caso anterior, se observa que en cuanto el aire disminuye su velocidad, las temperaturas en el intercambiador se aproximan, tal como se puede observar en el período entre las 14:45 y 15:15h, en donde la intensidad de la radiación solar disminuyó hasta cerca de 250 W/m<sup>2</sup>.

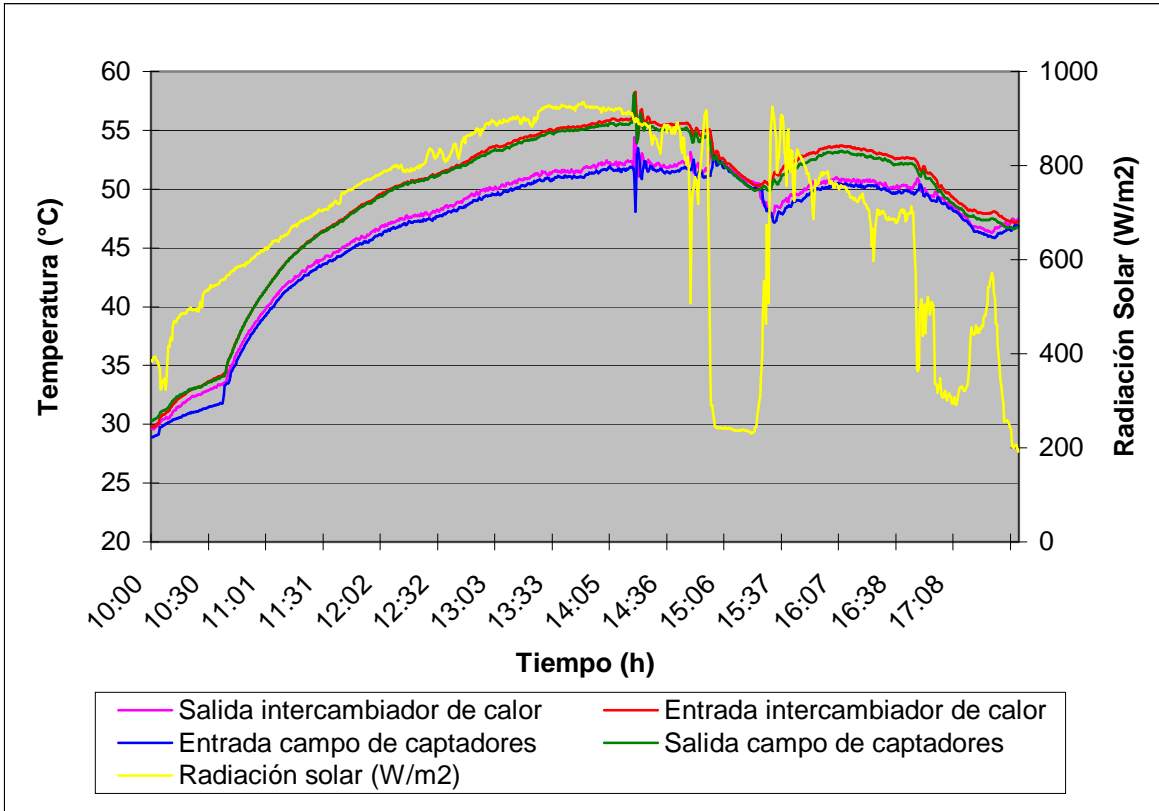


Figura 4.14 Variación de la temperatura del agua a un flujo de 50 l/h en función de la radiación solar

En la figura 4.15, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 60 l/h. En esta prueba la temperatura inicial del agua osciló entre 27 y 30 °C, y llegó a un valor máximo de 55 °C, aproximadamente a las 14:00h. A partir de las 11:00 se obtuvieron buenas condiciones de radiación solar, la cual osciló entre 700 y 950 W/m<sup>2</sup> y en donde las temperaturas variaron entre 40 y 55 °C, pudiéndose mantener un incremento de temperaturas en el intercambiador de cerca de 4 °C, hasta las 16:45h, en donde la radiación disminuyó cerca de 250 W/m<sup>2</sup>, y en este momento cesó la extracción de calor por parte del aire.



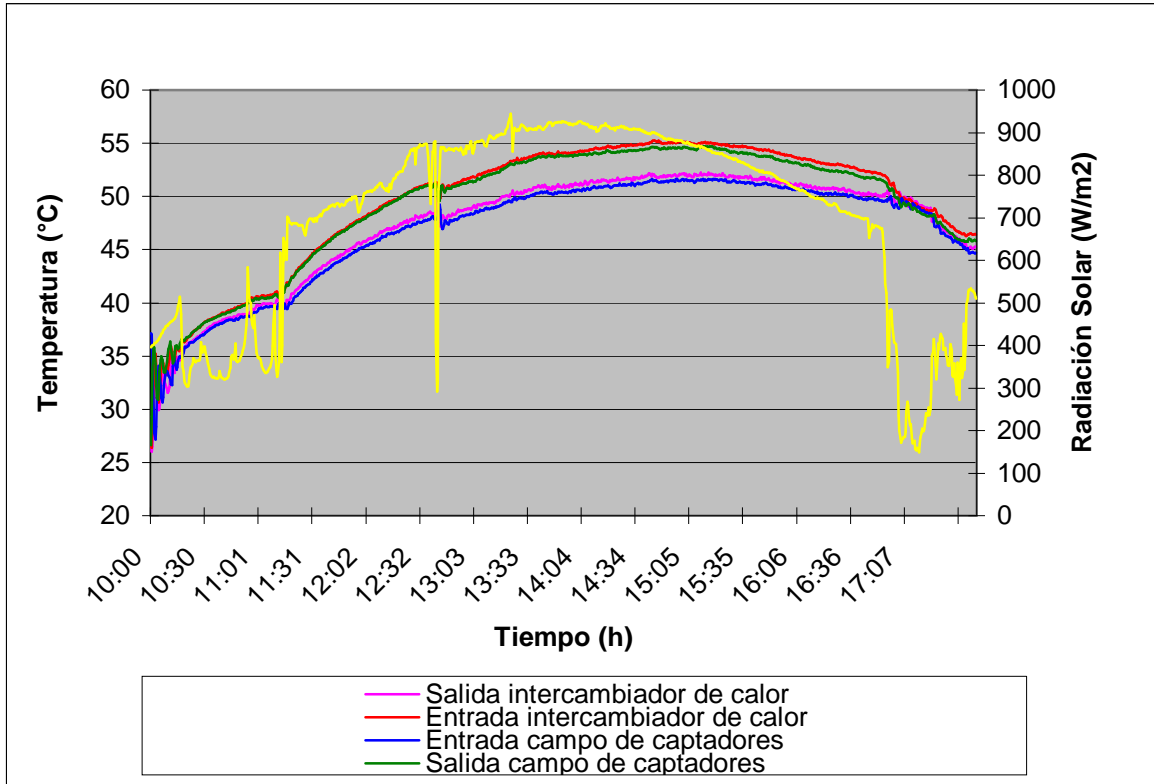


Figura 4.15 Variación de la temperatura a un flujo de 60 l/h en función de la radiación solar

#### 4.4.1.3. Variación de la temperatura, velocidad del aire y humedad relativa del aire al interior del túnel de secado.

##### 4.4.1.3.1. Variación de la velocidad del aire

Las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 representan las variaciones de las velocidades del aire en función de la radiación solar para cada uno de los días de pruebas y a los diferentes flujos de agua establecidos.

En la figura 4.16, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 40 l/h, y se observa un comportamiento muy irregular de la radiación solar, así como la gran dependencia de la velocidad del aire. La prueba inició a las 10:00 y se obtuvo un valor máximo de 2.5 m/s a una radiación solar cercana a los 1000 W/m<sup>2</sup>. La condición de diseño (valores arriba de 2 m/s) se mantuvieron desde las 11:30 hasta las 14:30h, para el dominio de radiación solar entre 800 y 1000 W/m<sup>2</sup>.

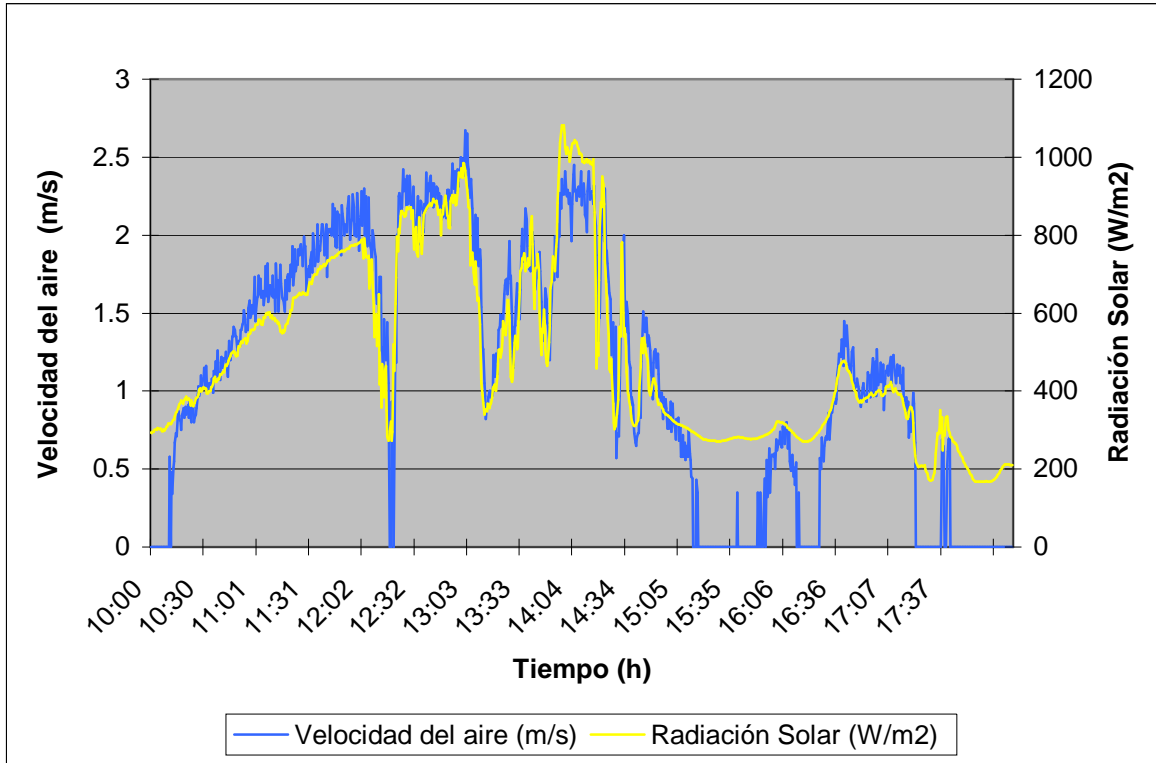


Figura 4.16. Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 40 l/h

En la figura 4.17, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 50 l/h. En este día, mejoraron las condiciones de la radiación solar y por consecuencia la distribución de la velocidad, a excepción del período entre las 14:30 y las 15:15 en donde disminuyó la radiación hasta cerca de  $250 \text{ W/m}^2$ , para poco después aumentar hasta  $900 \text{ W/m}^2$ , en donde la velocidad se mantuvo entre 1.75 y 2.3 m/s, hasta cerca de las 17:00h. La condición de diseño se mantuvo desde las 11:30 hasta las 18:00h, para un dominio de radiación solar entre  $675$  y  $900 \text{ W/m}^2$ .

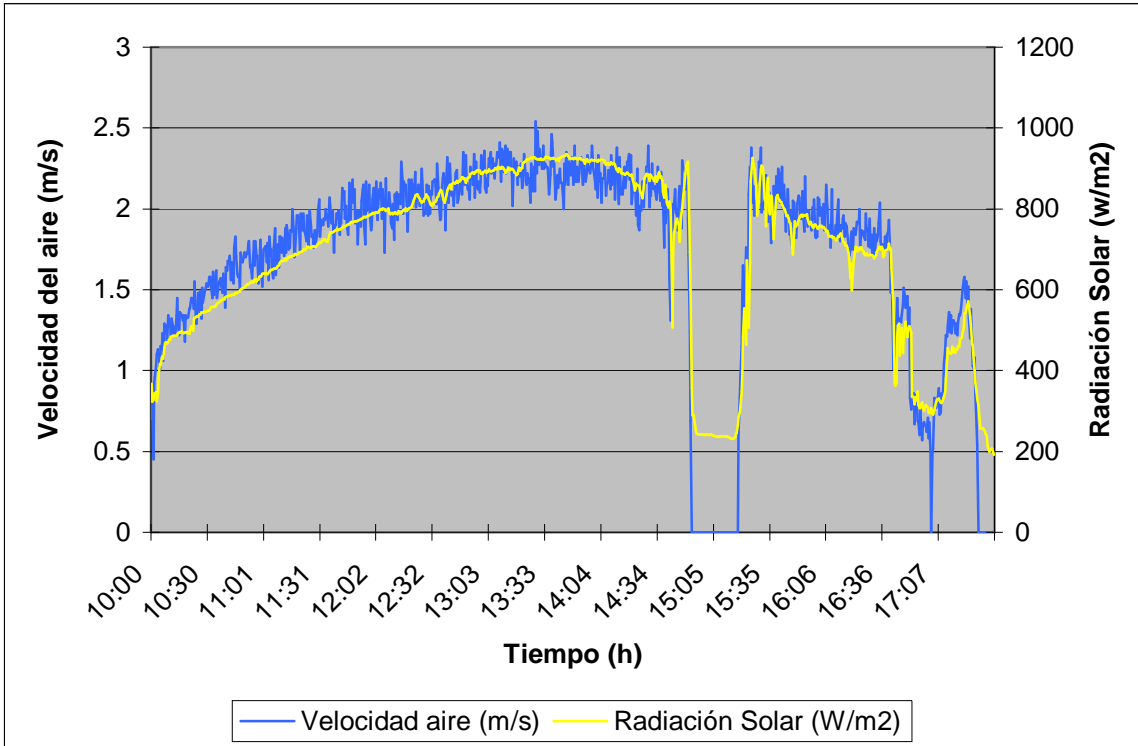


Figura 4.17. Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 50 l/h

En la figura 4.18, se reportan los resultados correspondientes a un flujo de agua de 60 l/h. Durante el desarrollo de esta prueba, como en el caso anterior, se obtuvieron buenas condiciones de radiación solar a partir de las 11:00h hasta cerca de las 17:00, con radiaciones que oscilaron entre 700 y 900 W/m<sup>2</sup>, en donde se obtuvieron valores de la velocidad del aire entre 2 y 2.5 m/s.

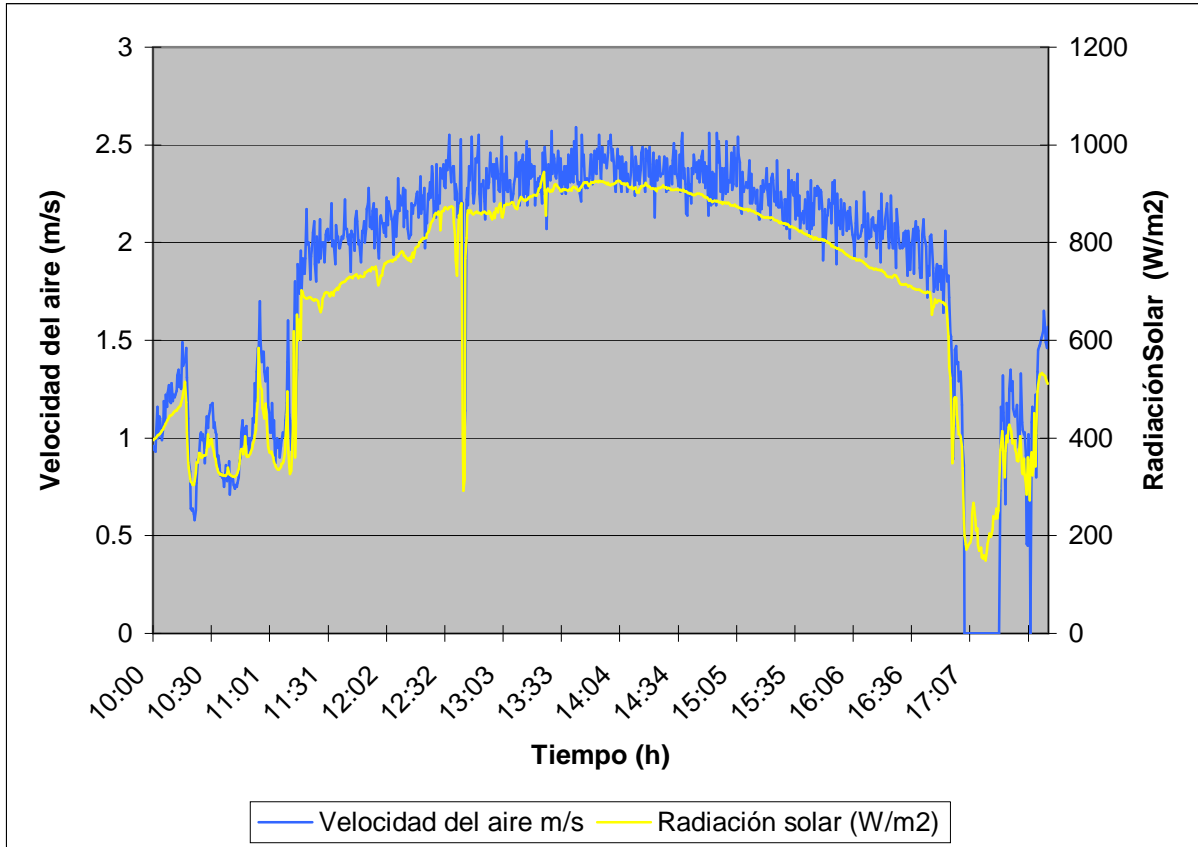


Figura 4.18. Variación de la velocidad del aire al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 60 l/h

#### 4.4.1.3.2 Evolución de la humedad relativa

En las figuras 4.19, 4.20y 4.21, se representan las variaciones de la humedad relativa del aire, durante los días de prueba, para los diferentes flujos de agua establecidos. En general se puede observar una rápida disminución de la humedad relativa a medida que la intensidad de la radiación solar aumenta. Lo anterior debido al aumento de la temperatura al interior del túnel de secado. Durante el periodo experimental se obtuvo una variación de humedad relativa del 36 al 72%, disminuyendo rápidamente al principio y después manteniéndose en valores entre un 20 y 8%.

La figura 4.19, presenta la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado para un flujo de agua de 40 l/h en el intercambiador, así como de la radiación solar.

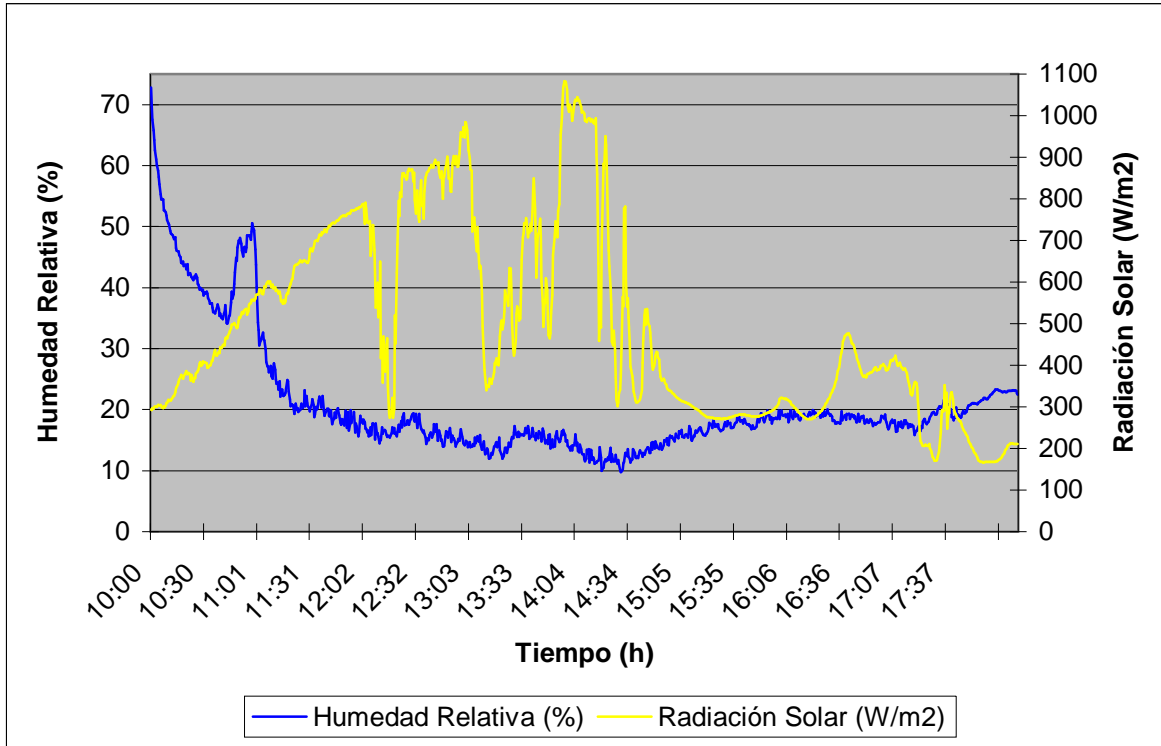


Figura 4.19. Variación de la humedad relativa al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 40 l/h

Para este día de prueba, la humedad relativa inicial del aire, HR fue muy alta, de un 72%, disminuyendo rápidamente en un 20% en un lapso de 1h y se mantuvo entre un 20 y 10% por un período de cerca de 6 h (17:15). Se puede observar la dependencia con la radiación solar, ya que para un valor alto de irradiancia solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ , se obtuvo la HR más baja, cerca del 10%. Al disminuir la radiación solar incidente aumenta la HR, por el efecto de la temperatura del aire.

La figura 4.20, presenta la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado para un flujo de agua de 50 l/h en el intercambiador, así como de la radiación solar.

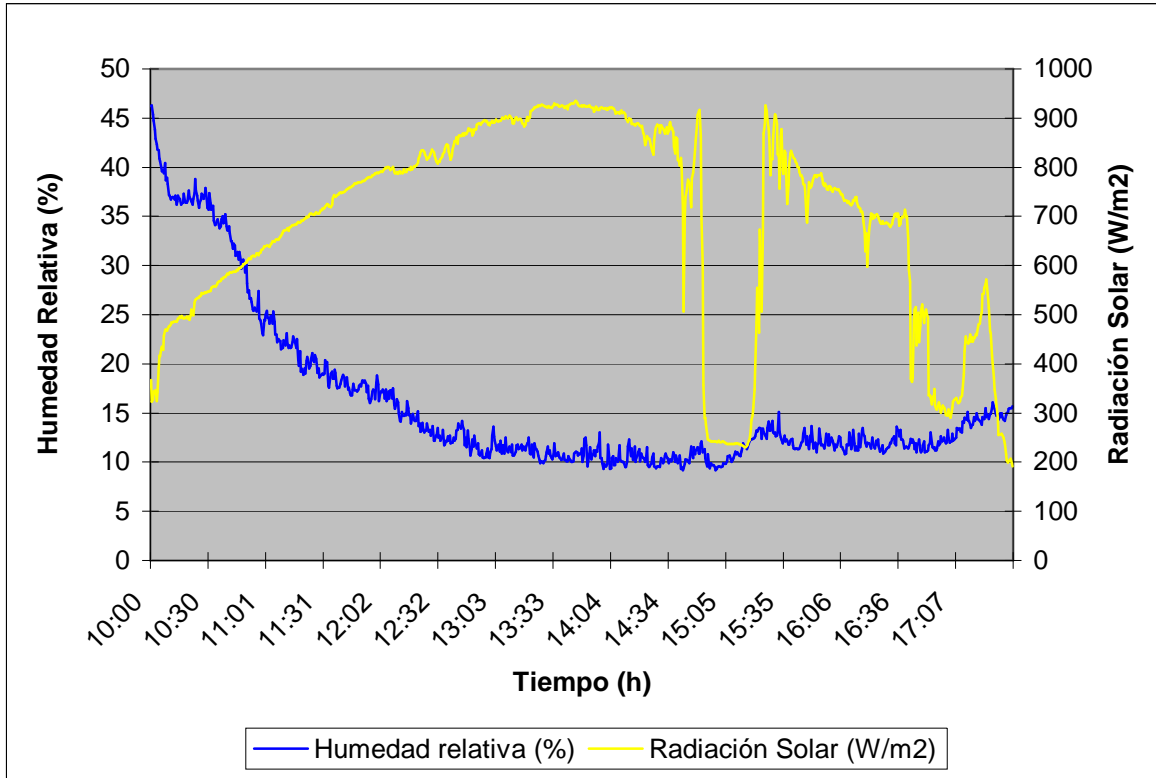


Figura 4.20. Variación de la humedad relativa al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 50 l/h

En esta prueba como en el caso anterior se observa una disminución rápida de la HR y luego un período de poca variación. En este caso la HR inicial fue del 47%, disminuyendo rápidamente hasta 20%, manteniéndose posteriormente en un dominio entre el 10 y el 15%, durante un período de 5 horas (12:00 a 17:15), para un intervalo de irradiancia solar entre 700 y 900 W/m<sup>2</sup>.

La figura 4.21, muestra tanto la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado para un flujo de agua de 60 l/h en el intercambiador, así como de la radiación solar. Se observa una disminución de la HR, con una velocidad decreciente constante, con valores más bajos, en comparación con las experiencias anteriores, con valores por debajo del 10%. La HR inicial fue de 36% y se mantuvo cerca del 8% durante cerca de 3 horas (17:15).

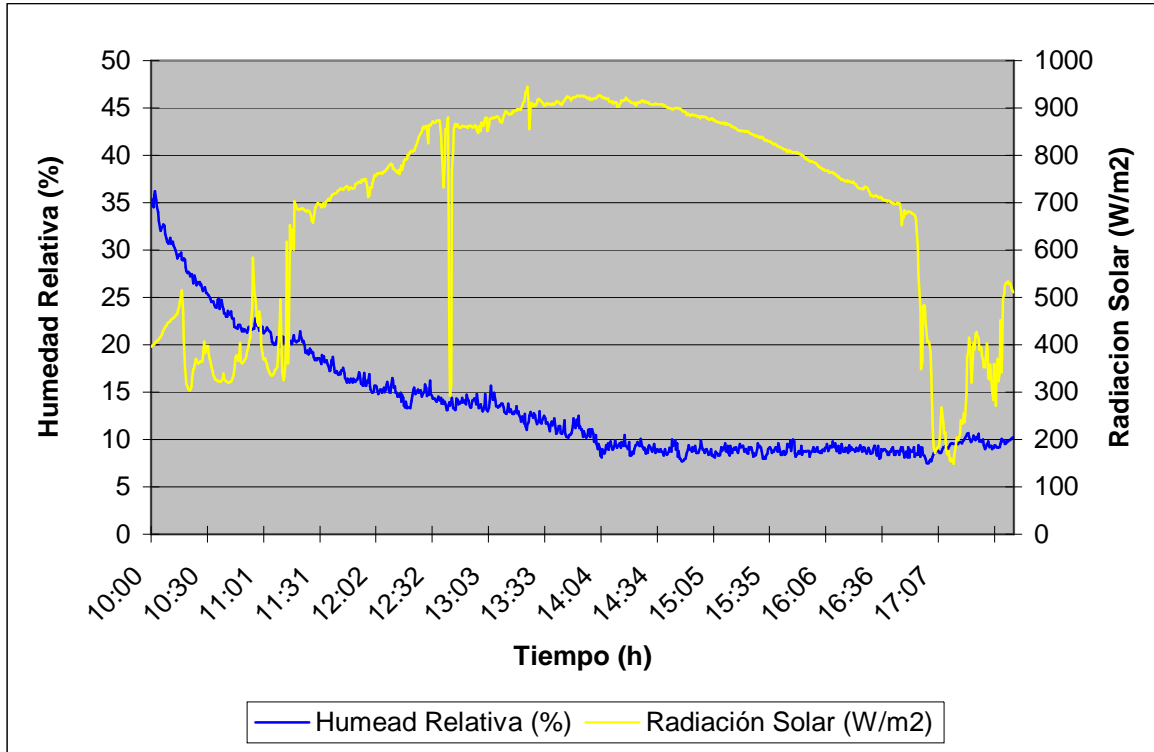
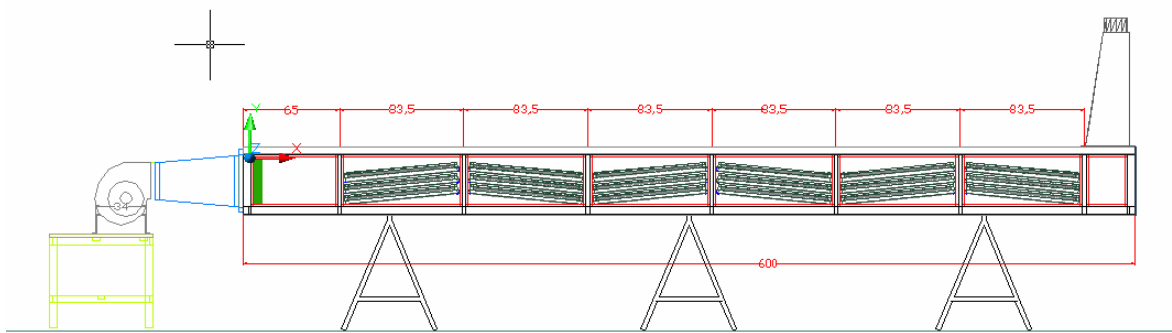


Figura 4.21. Variación de la humedad relativa al interior del túnel de secado en función de la radiación solar a un flujo de agua de 60 l/h

#### 4.4.1.3.3. Evolución de la temperatura del aire

En la siguiente figura se observa la distribución de las secciones y de las charolas en el túnel de secado, esta ayudará a entender mejor la distribución de las temperaturas en cada una de las charolas.



	sección 1	sección 2	sección 3	sección 4	sección 5	sección 6	
Nivel I	charola 1	charola 4	charola 7	charola 10	charola 13	charola 16	
Nivel II	charola 2	charola 5	charola 8	charola 11	charola 14	charola 17	
Nivel III	charola 3	charola 6	charola 9	charola 12	charola 15	charola 18	

Figura 4.22. Distribución de las charolas dentro del túnel de secado.

Las figuras 4.23, 4.24 y 4.25 representan las variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado, para los tres diferentes flujos determinados de 40, 50 y 60 l/h.

La figura 4.23, representa las variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel, para un flujo establecido de agua de 40l/h. Se muestran las oscilaciones de temperatura en las diferentes secciones del túnel y las diferencias entre ellas no fueron muy importantes, registrándose una diferencia entre 1 y 4 °C. Las oscilaciones más importantes fueron a lo largo del túnel, en donde se alcanzaron las temperaturas más altas de 47 °C en la primera sección y de 43.78 en la sexta sección. A las 11:00h se alcanzaron los 35 °C y se alcanzó el máximo de 47 °C. Se obtuvieron oscilaciones entre 40 y 45 °C entre las 11:30 y 13:00 y de 35 a 40 °C. En esta experiencia como se puede observar se obtuvieron temperaturas entre 35 y 45 °C por un período de cerca de 6 horas (11:00 a las 17:45).

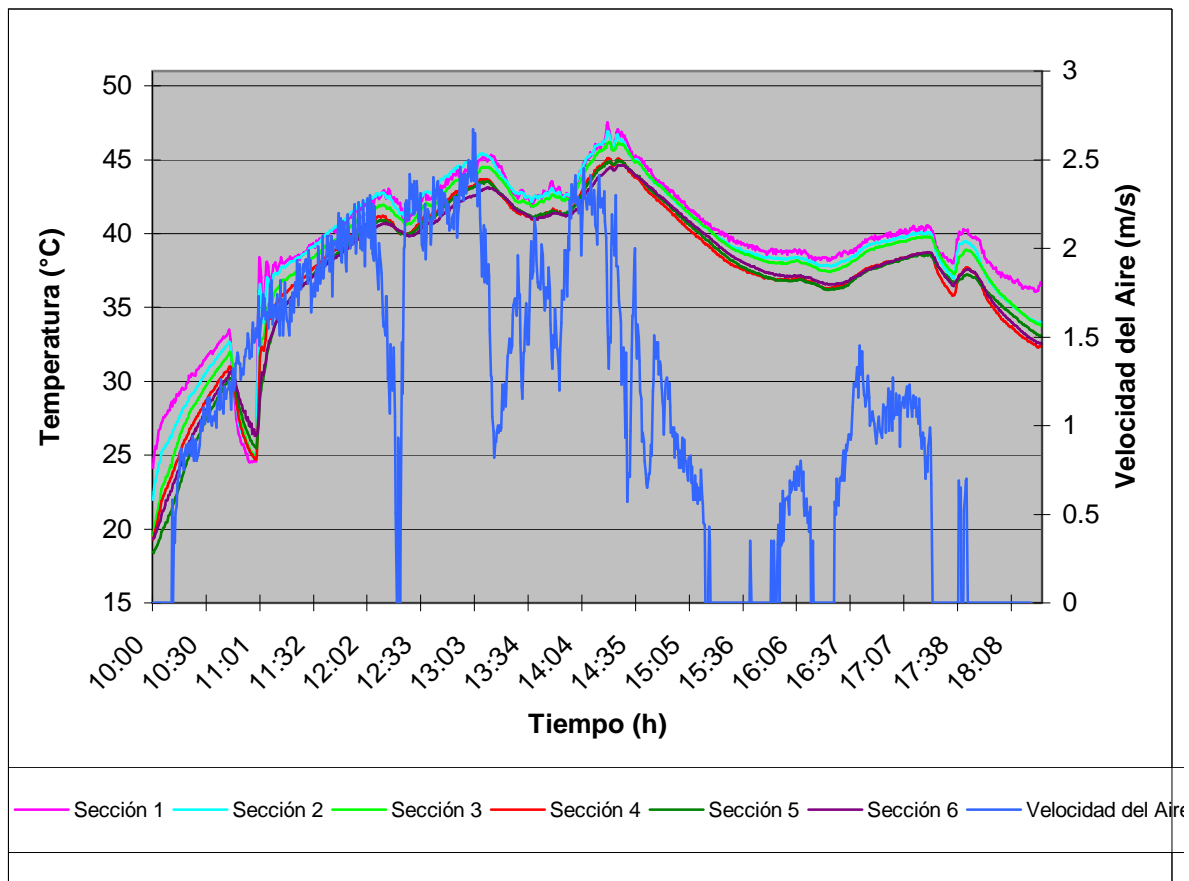


Figura 4.23. Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo establecido de agua de 40 l/h

Con respecto a la velocidad del aire, la figura muestra una distribución que sigue el mismo comportamiento que la radiación solar. Se alcanzó un valor máximo de 2.5 m/s. Debido a las condiciones de baja irradiación solar, sólo se



puo mantener un período muy corto con una velocidad superior a los 2 m/s (13:55 -14:20), después comenzó a descender hasta valores menores a 1 m/s.

La figura 4.24, representa las variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel, para un flujo establecido de agua de 50l/h.

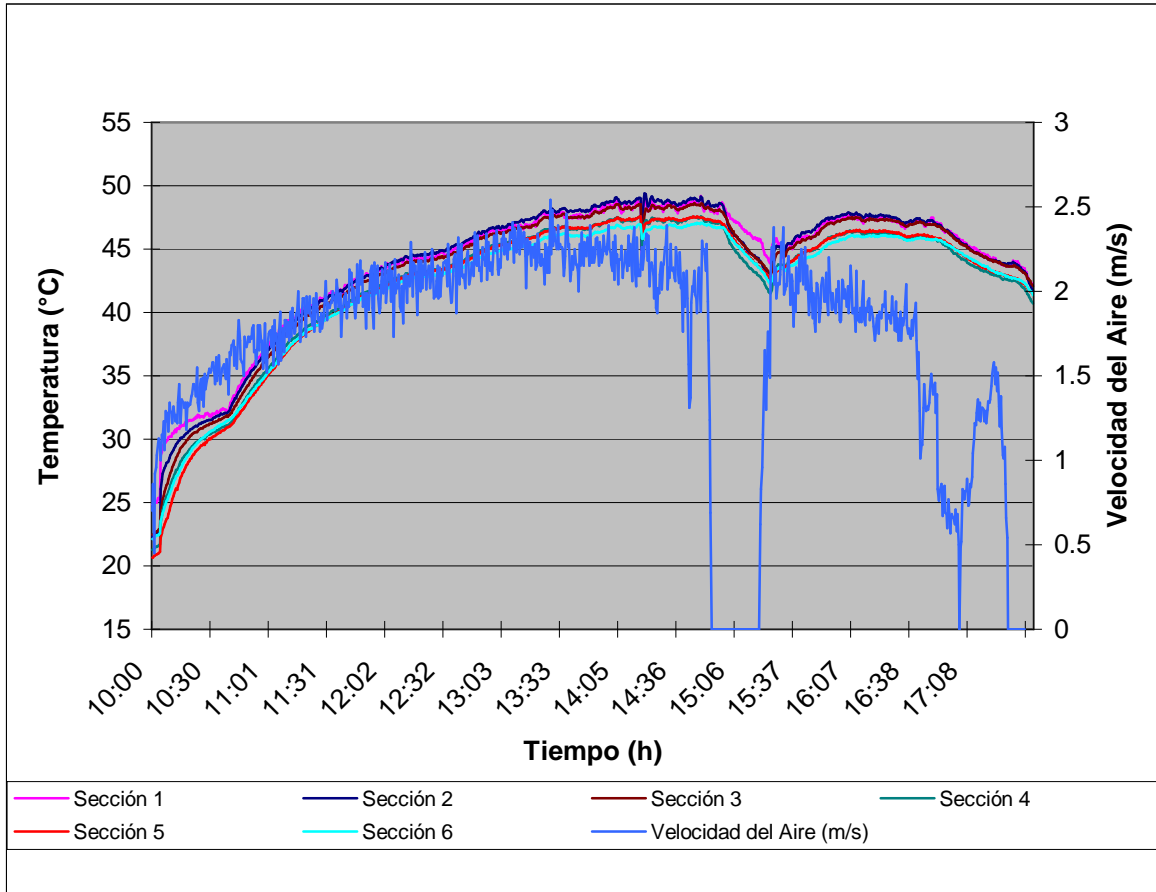


Figura 4.24. Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo de agua de 50 l/h

Como en el caso anterior, no hubo diferencias de temperatura importantes entre las secciones. Debido a las mejores condiciones de radiación solar, se obtuvieron temperaturas más elevadas. A las 11:00 se obtuvo el valor de 40 °C y los valores máximos entre 47 y 48 °C en el intervalo de 13:00 a 15:00 h, manteniendo valores de diseño entre 40 y 45 °C, en un intervalo amplio entre las 12:00 y 17:00.

En cuanto a la distribución de la velocidad del aire, esta fue bastante homogénea, debido a una mayor intensidad de la radiación solar, en donde se alcanzó un máximo de 2.37 m/s a las 13:30h. Se lograron las condiciones de diseño entre 2 y 2.3 m/s entre las 11:15 y las 14:30h, descendiendo posteriormente la velocidad.

La figura 4.25 representa las variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel, para un flujo establecido de agua de 60 l/h. Esta figura muestra el aumento en la temperatura hasta un valor máximo de 47 °C.

El dominio de temperaturas se mantuvo más o menos constante entre 45 y 47 °C, durante el período entre 13:00 y 17:00 horas, con valores máximos de radiación de 900 W/m<sup>2</sup>.

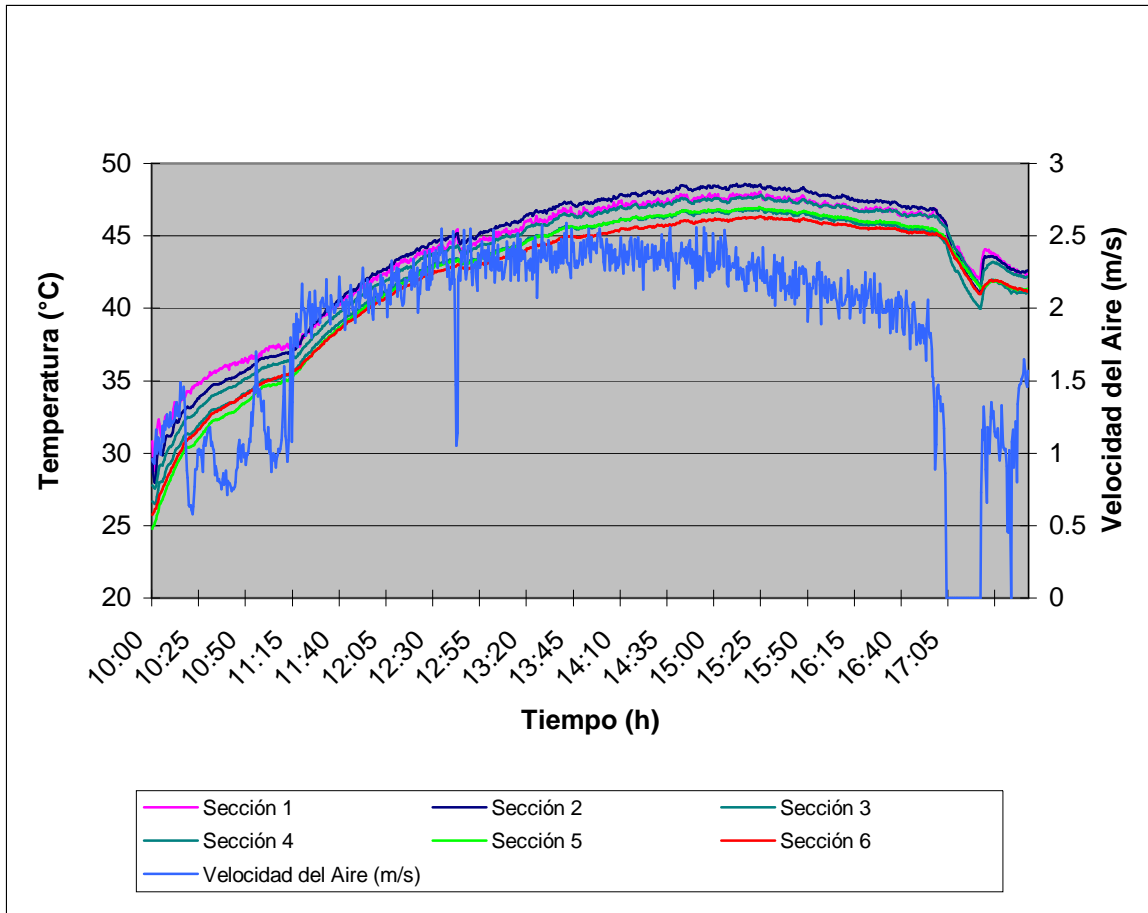


Figura 4.25. Variaciones de la temperatura y de la velocidad del aire al interior del túnel de secado a un flujo de agua de 60 l/h

Con relación a la velocidad del aire, se tuvo en el período de las 11:15 a las 14:30 en valores entre 2 y 2.3 m/s, con un máximo de 2.37 m/s a las 13:30 y a partir de las 15:00 empezó a disminuir, de acuerdo al comportamiento de la radiación solar.

Como se puede observar, en la mayoría de las pruebas realizadas se alcanzaron las condiciones de diseño para el tratamiento del arroz, es decir un intervalo de temperaturas entre 40 y 45 °C y de velocidades del aire entre 2 y 2.5 m/s.

#### 4.4.2. Pruebas preliminares de secado solar de arroz (palay) re-hidratado.

##### 4.4.2.1. Consideraciones generales

El estudio experimental del secado de arroz re-hidratado se realizó durante el mes de julio, en donde se presentan condiciones climáticas similares a las que

se tienen en la época de cosecha (agosto-septiembre), por lo general se tienen temperaturas moderadamente altas (máximas 32 °C) y humedades altas del aire.

Del estudio experimental realizado, se reportan los días , 5, 10 y 11 de julio de 2007. Cada una de estas pruebas se realizó con un flujo de agua de 50 l/h y para cada uno de ellos se presentan las variaciones de los parámetros climáticos, como radiación solar y temperatura ambiente así como los operacionales: comportamiento del sistema solar de calentamiento y las evoluciones de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire al interior del túnel de secado. Adicionalmente se presentan las evoluciones del contenido de humedad en cada una de las 6 secciones y de los tres niveles en cada una de ellas a lo largo del túnel de secado. Con los datos anteriores se calcula la velocidad de deshidratación en grados de humedad por hora, para cada una de las 18 charolas.

#### 4.4.2.2. Resultados experimentales

##### 4.4.2.2.1 Resultados experimentales del 5 de julio

La figura 4.26, muestra las variaciones de la irradiancia solar del día 5 de julio de 2007. Como se puede apreciar, se tuvieron bajos índices de irradiancia solar y se observó la presencia de cierta nubosidad repartida durante todo el día. Esta situación es característica del verano en el sitio de pruebas.

Los valores máximos de radiación solar entre 800 y 1000 W/m<sup>2</sup>, se obtuvieron entre las 12:30 y las 14:30, después oscilo entre 800 y 600 W/m<sup>2</sup> hasta las 17:30 para después descender hasta el final del día.

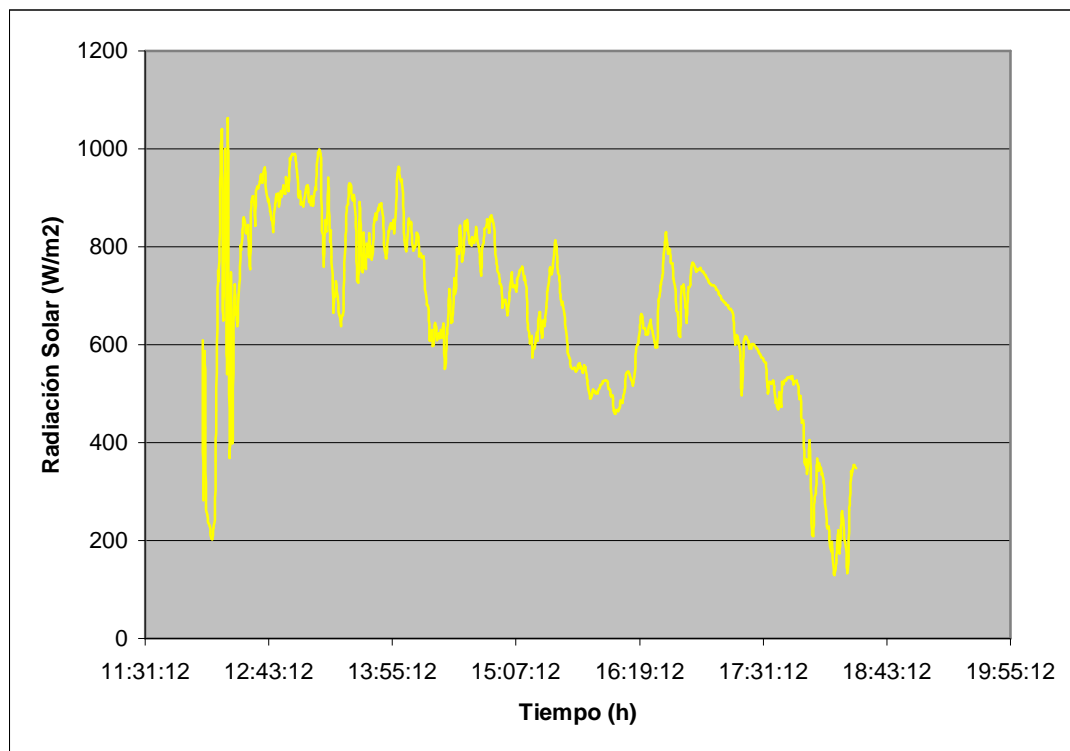


Figura 4.26. Variaciones de la irradiancia solar (5 de julio)

La figura 4.27, representa las variaciones de la temperatura del agua en el campo y en el intercambiador de calor. La prueba inició a las 12:00 y después de media hora, empezó haber recuperación de calor por parte del aire al interior del túnel. La máxima temperatura de 52 °C se alcanzó a las 14:00. La temperatura de entrada al intercambiador varió de 50.8 a 45 °C de las 13:00 a las 17:30 y la de salida entre 48 y 45 °C. La diferencia en temperaturas entre las condiciones de entrada y salida del intercambiador varió entre 3 y 4 °C durante el período comprendido entre las 12:30 y las 18:00h.

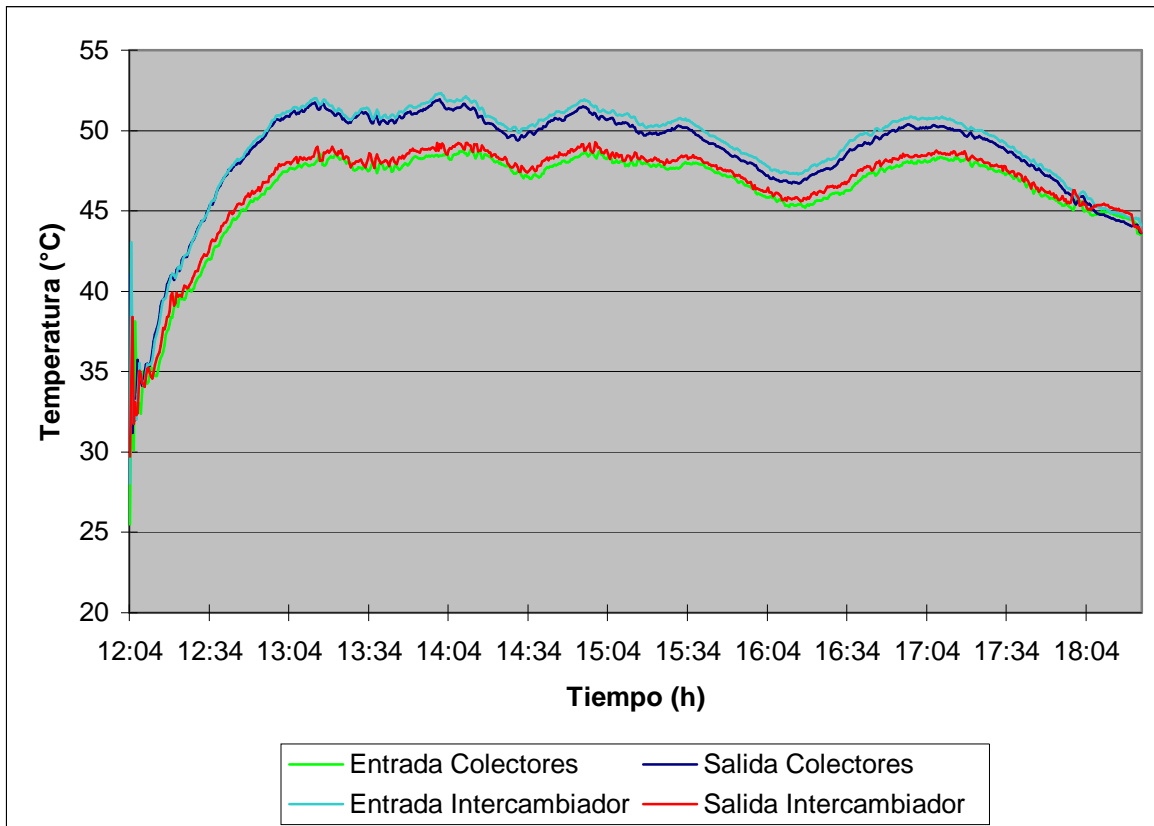


Figura 4.27. Variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores y en el intercambiador de calor (5 de julio)

La figura 4.28, presenta las variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la irradiancia solar. Como se puede observar, debido a la irregularidad en la intensidad de la radiación solar, hubo grandes oscilaciones en la velocidad del aire, alcanzándose un valor máximo de 2.28 m/s, correspondiendo a una irradiancia de 933 W/m<sup>2</sup>. Se obtuvieron pocos intervalos con velocidad superior a los 2 m/s, la mayoría entre 1.5 y 2 m/s entre las 12:30 y las 15:30h y después un corto período entre las 16:30 y las 17:30.

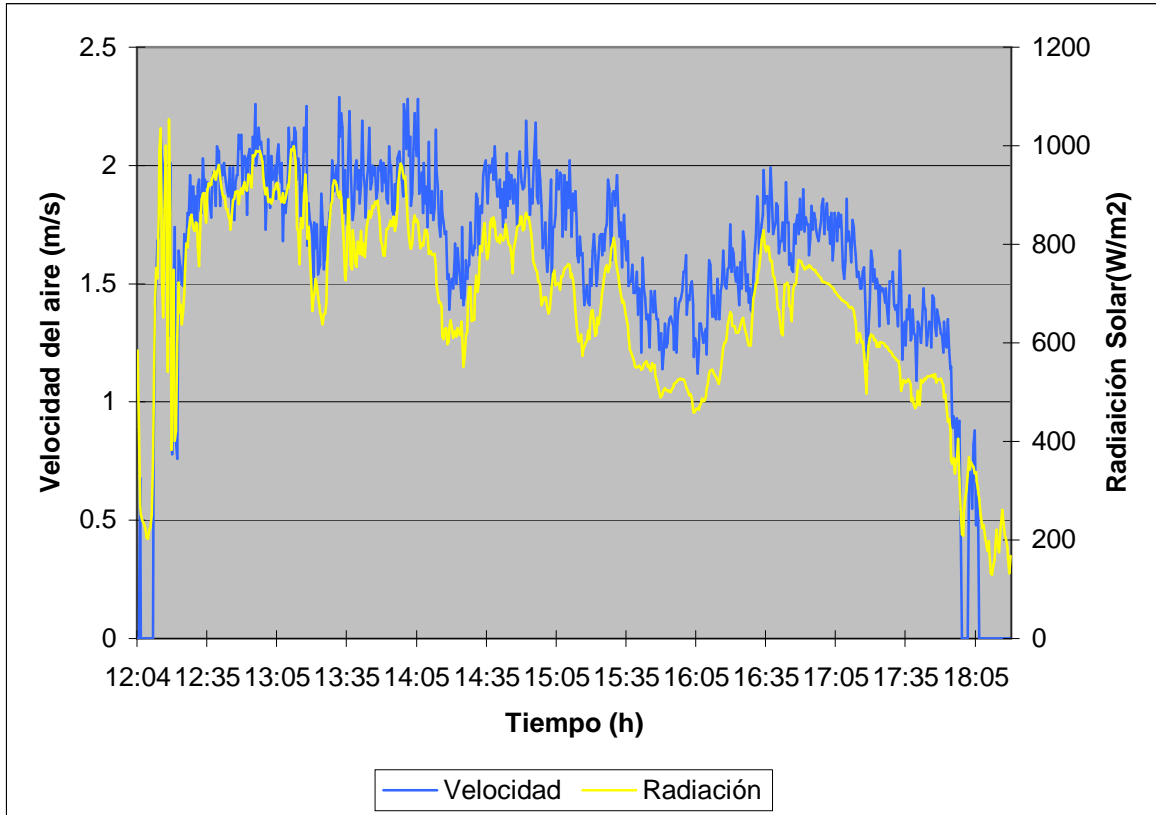


Figura 4.28. Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel de secado y de la radiación solar (5 de julio)

La figura 4.29, representa la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel. Como se aprecia, la humedad relativa inicial del aire fue muy alta del orden del 80% y una vez dentro del túnel descendió casi de manera constante hasta un valor de 30%, cerca de las 16:30h, posteriormente se mantuvo constante entre 28 y 27.5 % hasta las 18:00h.

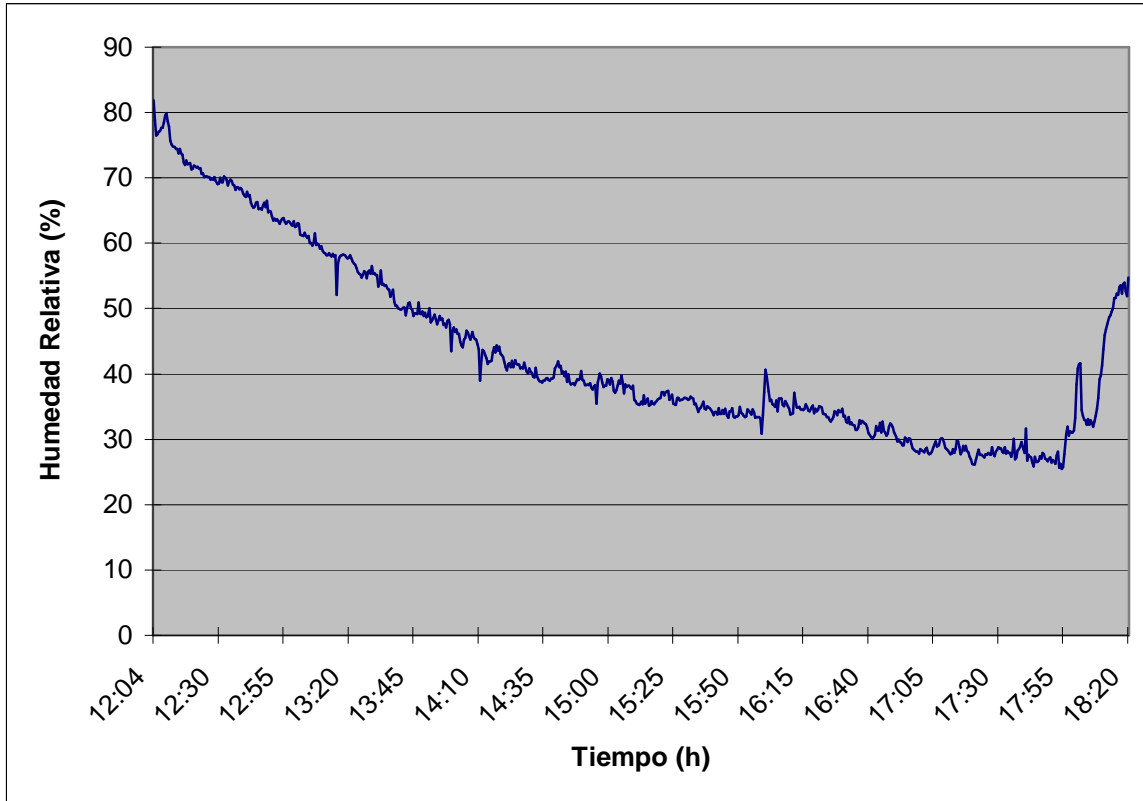


Figura 4.29. Variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado (5 de julio)

La figura 4.30, muestra las evoluciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones. Como se puede apreciar, no existe una homogeneidad en la temperatura, hay diferencias entre las diferentes secciones. La más alta temperatura del aire se alcanzó en la primera sección, cerca de los 40 °C, manteniéndose cerca de 1 h en esta condición. La temperatura más baja del aire se obtuvo en la sección 4 en un intervalo entre 25 y 30 °C, lo anterior posiblemente debido a la alta humedad presente en esta sección. En el resto de las demás, la temperatura del aire al interior del túnel varió entre 25 y 36 °C.

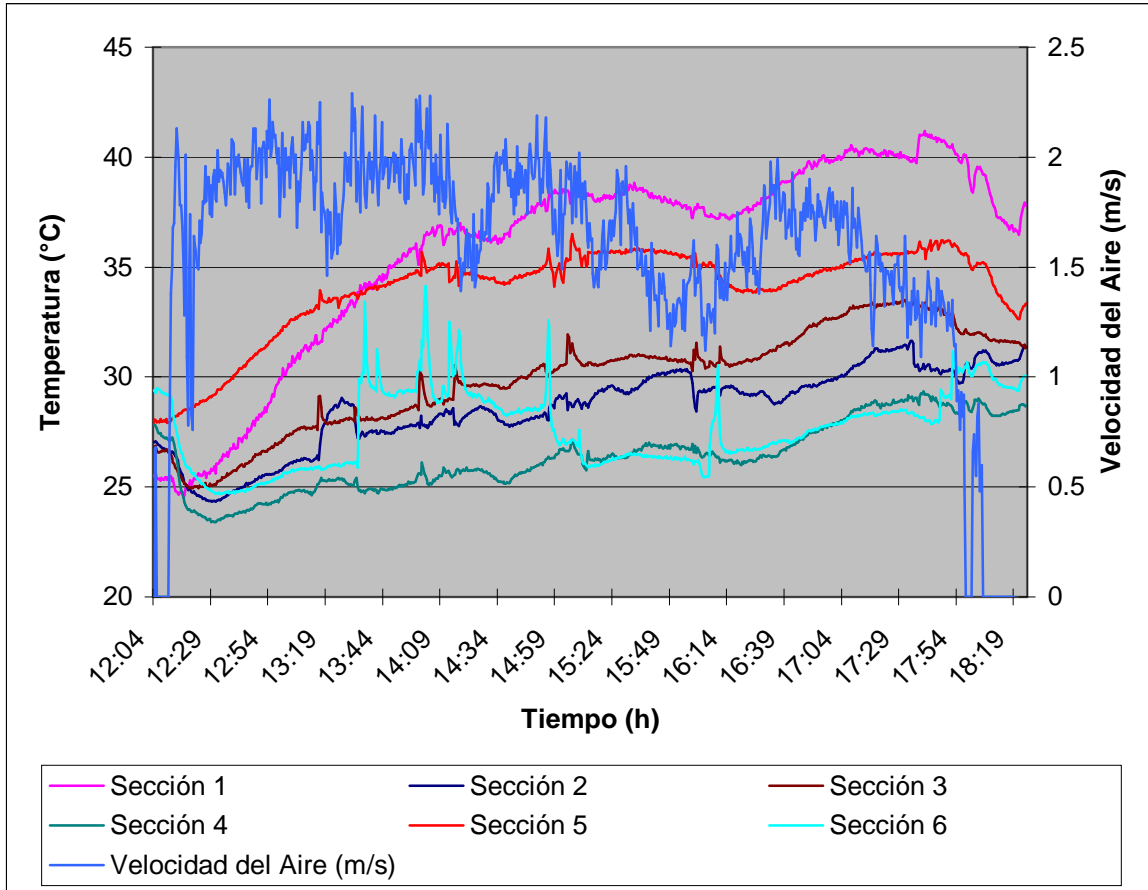


Figura 4.30. Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones (5 de julio)

La figura 4.31, representa las variaciones de la humedad en el grano en cada una de los diferentes niveles (charolas) de cada una de las seis secciones que integran el túnel de secado. Cada una de estas evoluciones, representa la curva de secado operacional, dentro del dominio de humedades contenida en el grano, producto de la deshidratación. Como se observa las pendientes de las curvas son diferentes y los segmentos rectos corresponden en la mayoría de los casos a los períodos de velocidad de secado constante, en esta parte del proceso la humedad libre se extrae relativamente fácil, sin embargo al final de esta sección la velocidad disminuye y se requiere mas energía para extraer el agua faltante. Entre más humedad tenga el producto su velocidad de extracción de agua será mas rápida al principio del proceso.

En esta experiencia sólo se determinó el contenido de humedad en el grano, en cierto número de niveles (charolas), lo anterior con el objeto de observar el comportamiento general de la cinética de secado. en particular en los primeros y últimos de manera alternada en cada sección, es decir, en el nivel III de la sección I, en el nivel I de la sección II, en el nivel III de la sección III, en el nivel I de la sección IV, en el nivel III de la sección V y finalmente en el nivel I de la sección VI. Las humedad inicial varió entre un 27 y 31.9% y el proceso de secado de arroz se realizó en el período entre las 12:00 y as 17:00h.

La velocidad de secado más alta se registro en el nivel I de la sección I, con un valor de 2.61 grados de humedad por hora y la más baja en el nivel III de la sección V, con un valor de 1.18, los demás valores de la velocidad en el resto de las secciones varió entre 2.1 y 1.4. En la tabla 1, están representados los datos de la velocidad de secado y los intervalos de humedad obtenidos en el grano de arroz.

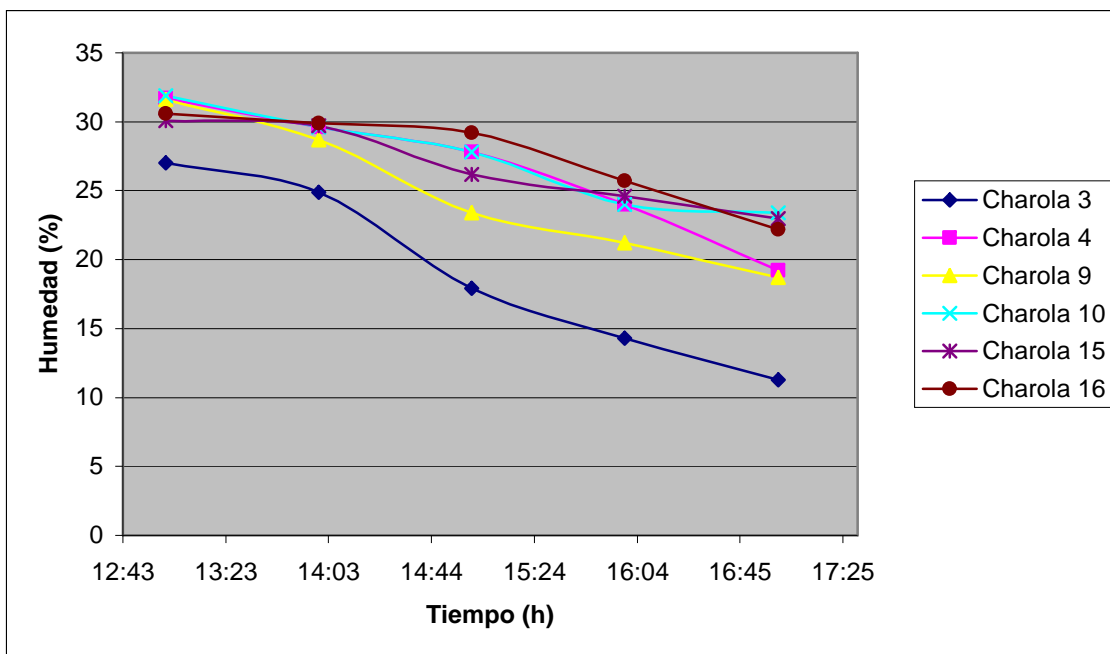


Figura 4.31. Variaciones de la humedad en el grano (5 de julio)

#### 4.4.2.2.2 Resultados experimentales correspondientes al día 10 de julio de 2007

Debido a las altas humedades alcanzadas en el proceso de re-hidratación del arroz con cáscara, la cual se desarrollo con agua a una temperatura de 24 °C, y cerca de 12h, se logró una distribución de humedades que oscilaron entre 35 y 41.5%. Con base a lo anterior, se hicieron dos pruebas consecutivas, una primera etapa hasta lograr una humedad final, cercana a la contenida en el arroz cosechado, es decir entre un 24 y un 28%, (prueba del día 10 de julio) y una segunda etapa, para obtener una humedad final cercana al 13% (prueba del 11 de julio).

##### 4.4.2.2.2.1 Resultados primera etapa (10 de julio de 2007)

La figura 4.32, representa las variaciones de la irradiancia solar del día 10 de julio de 2007. Como se puede apreciar, la distribución de la irradiancia solar fue bastante homogénea, con valores máximos de 900 W/m<sup>2</sup>, manteniéndose altos



índices entre 850 y 900 W/m<sup>2</sup>, en el período de las 13:00 a las 15:00, para después descender hasta el final del día.

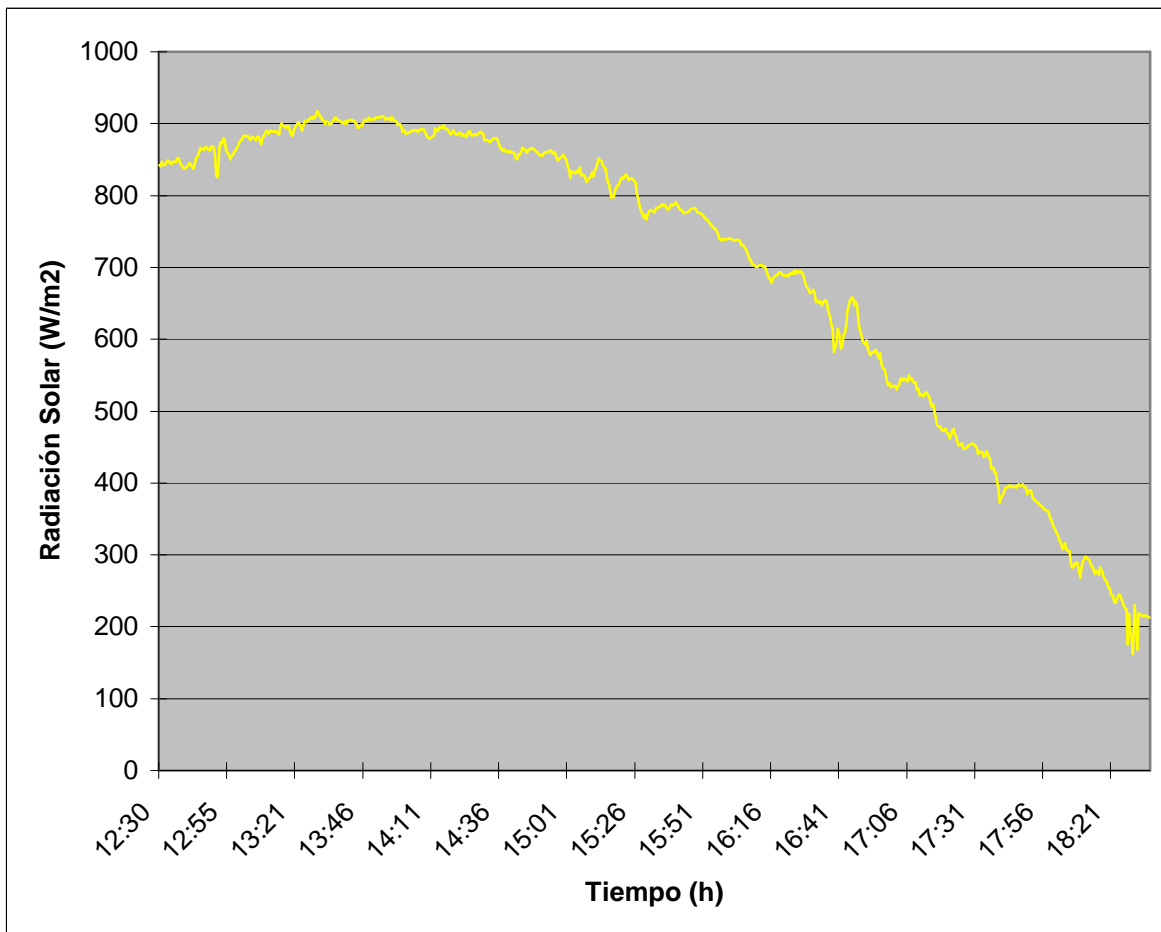


Figura 4.32. Variaciones de la radiación solar a lo largo del día (10 de julio)

La figura 4.33, representa las variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor. La prueba inició a las 12:30 y después de media hora, la temperatura de salida de los captadores y entrada al intercambiador fue inicialmente de 47 °C, con un valor máximo de 54 °C, durante el intervalo entre las 13:00 y las 17:00h, la temperatura varió entre 49.8 y 53.7 °C. La temperatura a la entrada del campo de captadores solares fue de 43 °C y se alcanzó una máxima temperatura de 50 °C y se mantuvo entre 48 y 49.5 °C entre las 13:30 y las 16:45.

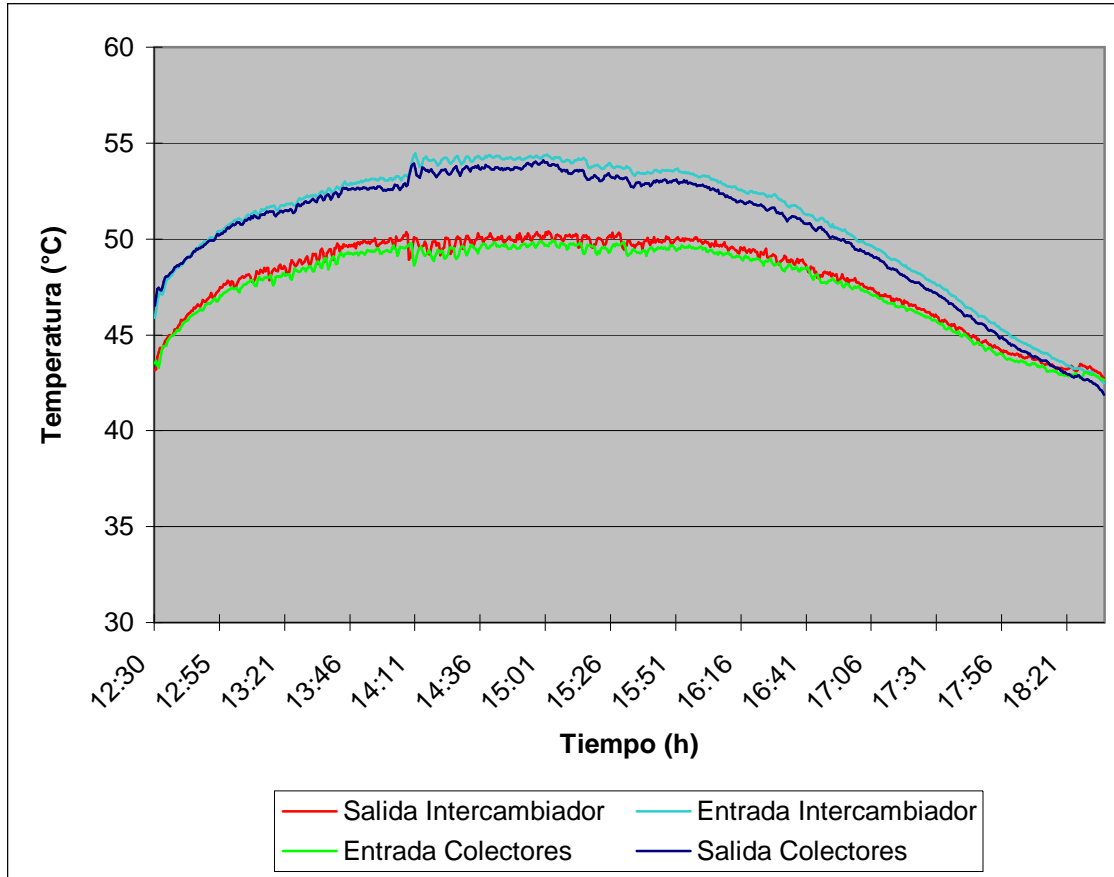


Figura 4.33. Variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor (10 de julio)

La diferencia en temperaturas entre las condiciones de entrada y salida del intercambiador varió entre 3 y 4 °C, debido principalmente a la extracción casi constante de calor por parte del aire, disminuyendo este intervalo hacia el final del día.

La figura 4.34, presenta las variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la irradiancia solar.

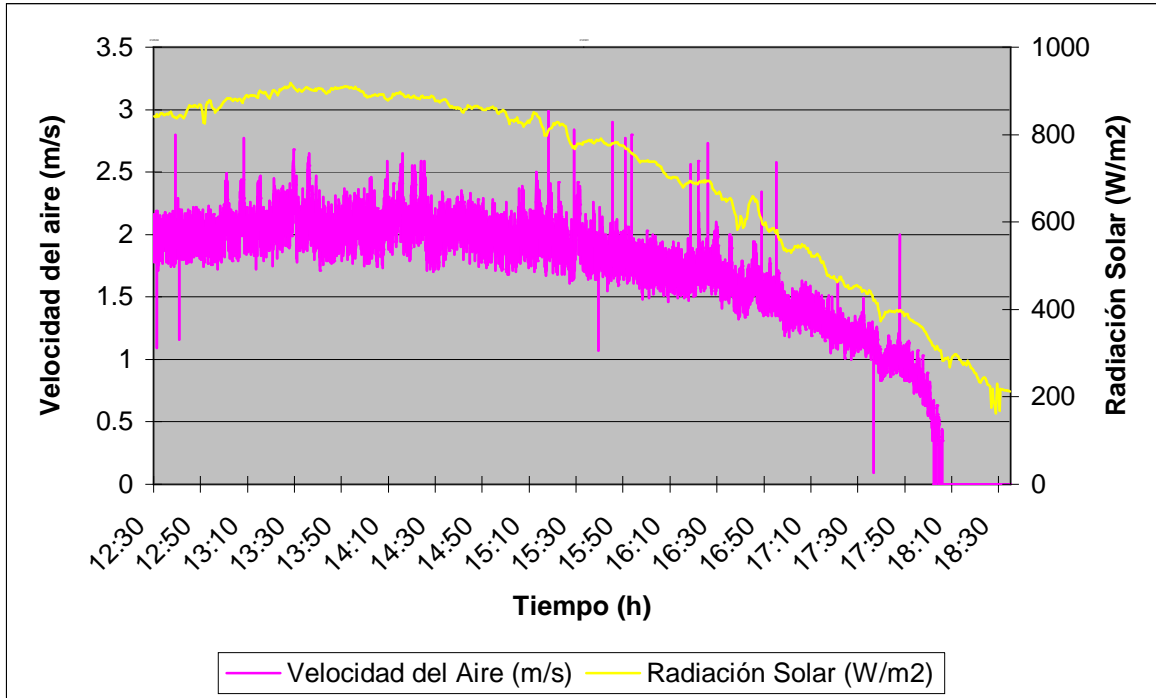
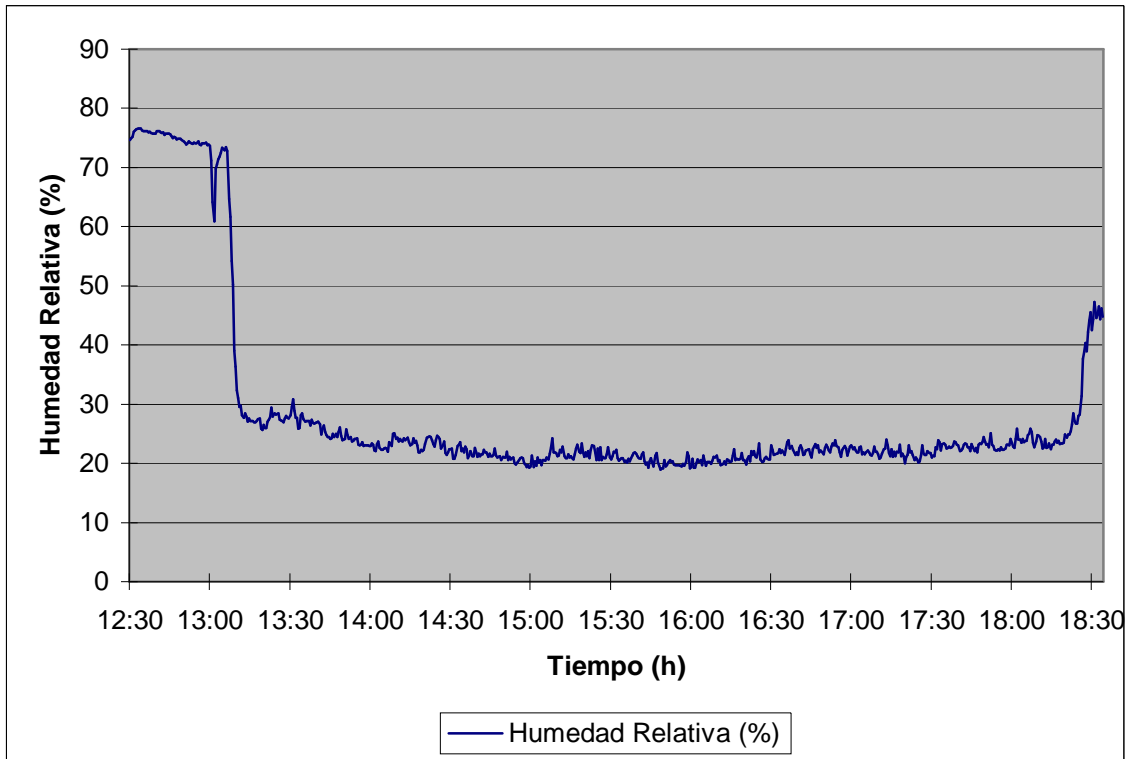


Figura 4.34. Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la radiación solar (10 de julio).

La figura 4.35, muestra la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel. Como se aprecia, la humedad relativa inicial del aire fue alta del orden del 75.2% (12:31h) y una vez dentro del túnel descendió bruscamente hasta un valor de 27.6 % (13:14h) y después más lentamente hasta un 20% (14:57h) y se mantuvo entre un 20% (14:36h) y un 23% (18.12h). Como se observa se presentó una buena constancia de la humedad relativa del aire, debido a su vez por la constancia en las temperaturas.



4.35. Variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel de secado (10 de julio).

La figura 4.36, muestra las variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones. Como se mencionó en experiencias anteriores y como se puede apreciar, no existe una homogeneidad en la temperatura, hay diferencias entre las diferentes secciones. Sin embargo en esta prueba se observó un comportamiento más estable, en donde las variaciones de la temperatura no fueron muy importantes. En la sección de mayor temperatura (1), la variación fue entre 43.5 y 45.9 °C, para el intervalo entre las 13:45 y las 17:30h. Se aprecia un comportamiento similar en las demás secciones, en donde la temperatura del aire en cada una de ellas va disminuyendo a excepción de la sección seis, (última) en donde se obtuvieron valores más altos. Además se puede apreciar que en la sección 3, no hubo un comportamiento regular de la temperatura.

La oscilación de temperatura entre todas las secciones fue de entre 30 y 45.7 °C. Cabe mencionar que el sistema responde rápidamente a las variaciones en la intensidad de la radiación solar.

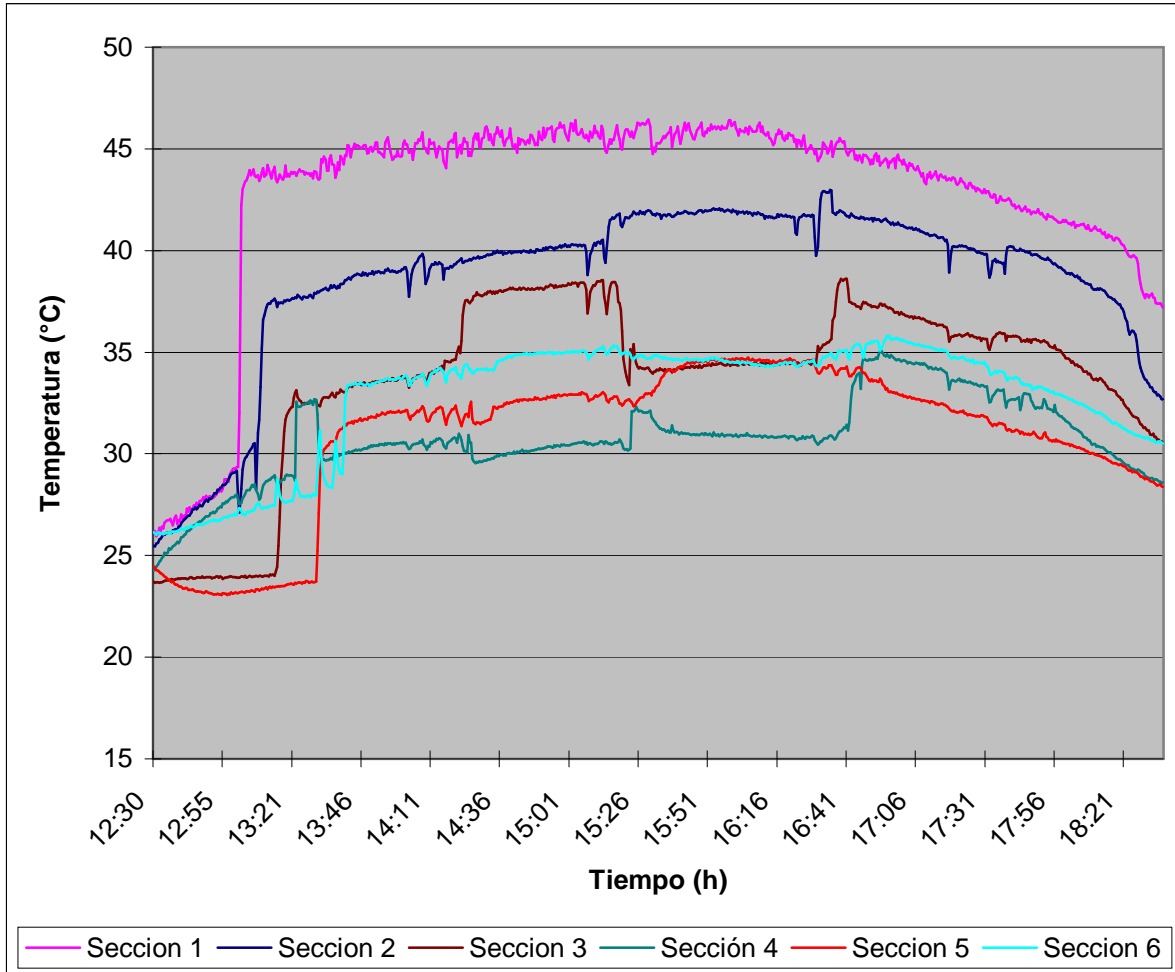


Figura 4.36. Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones (10 de julio)

La figura 4.37, representa las variaciones de la humedad contenida en el grano, en cada una de los diferentes niveles (charolas) de cada una de las secciones correspondientes. Cabe mencionar que debido a la distribución de la masa total de grano humedecido, la cantidad de arroz contenida en la charola del primer nivel de la última sección, no fue suficiente para el muestreo de 200g, necesario para la determinación de la humedad, por lo que no fue posible su registro. Las humedades iniciales variaron en cada una de las diferentes charolas, entre un 35 y un 41.7% en base húmeda. El proceso de secado de arroz duro el período entre las 12:00 y as 17:00h.

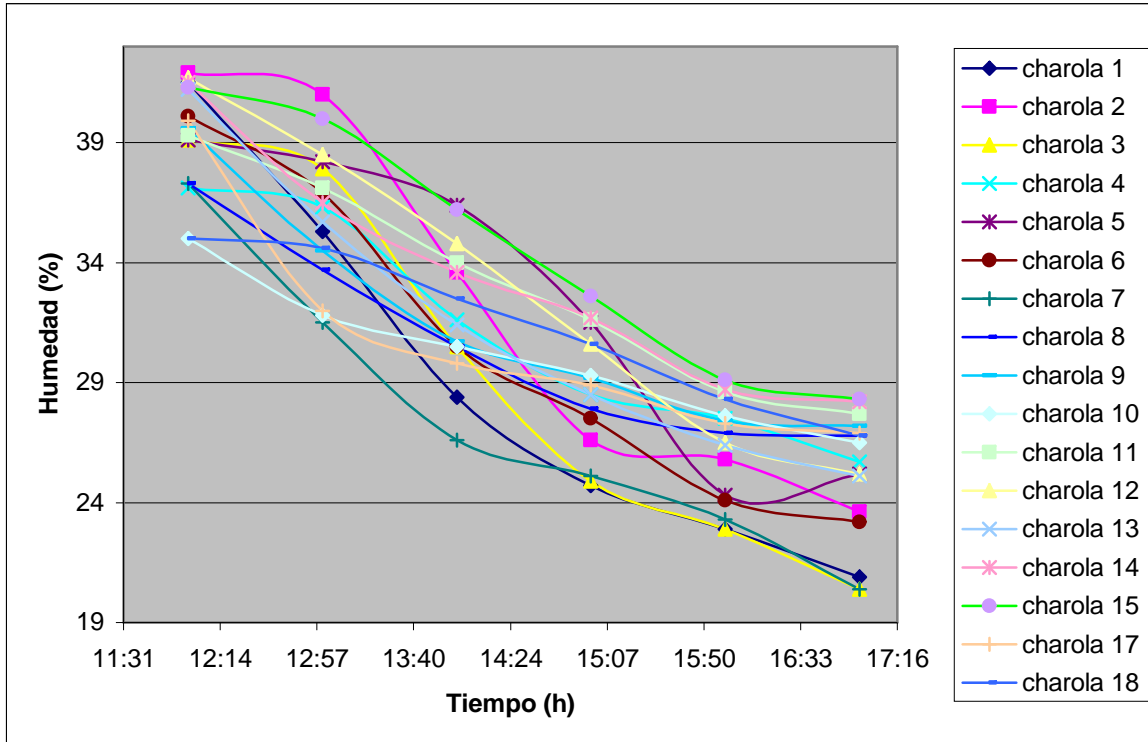


Figura 4.37. Variaciones de la humedad en el grano (10 de julio)

Cada una de las curvas de la figura 4.37, representa su cinética de secado es decir su velocidad, en donde se puede apreciar el valor más alto, el cual ocurrió en el primer nivel de la primera sección (charola 1), en donde se extrajeron 4.12 grados de humedad por cada hora, siendo la humedad inicial de 41.5 y la final de 20.9%. La velocidad más baja fue de 1.64, lo cual ocurrió en el tercer nivel de sección seis, en donde la humedad inicial fue del 35% y la final de 26.8%. El resto de las velocidades de secado, variaron entre 3.78 y 1.7, para humedades finales entre 28.3 y 20.9%.

#### 4.4.2.2.2 Resultados de la segunda etapa (11 de julio de 2007)

Los resultados experimentales obtenidos el día 11 de julio del 2007, son una continuación del proceso de secado el día 10, en donde las condiciones finales obtenidas en este día son las iniciales de este segundo período de pruebas. Sin embargo, debido a que el producto permaneció en el túnel de secado, continuó el proceso de deshidratación, por lo que las humedades iniciales del producto fueron menores que las finales de la primera etapa de secado.

La figura 4.38, representa la evolución de la irradiancia solar del día 11 de julio de 2007. Como se puede apreciar, la distribución de la irradiancia solar fue muy homogénea, sólo se presentaron algunos nublados entre las 13:00 y las 14:00, pero no afectaron el comportamiento del sistema. Como se puede observar, se obtuvo un intervalo de radiaciones por arriba de los 750 W/m<sup>2</sup> en el período entre las 11:30 y las 18:15h, obteniéndose un máximo de 995 W/m<sup>2</sup>.

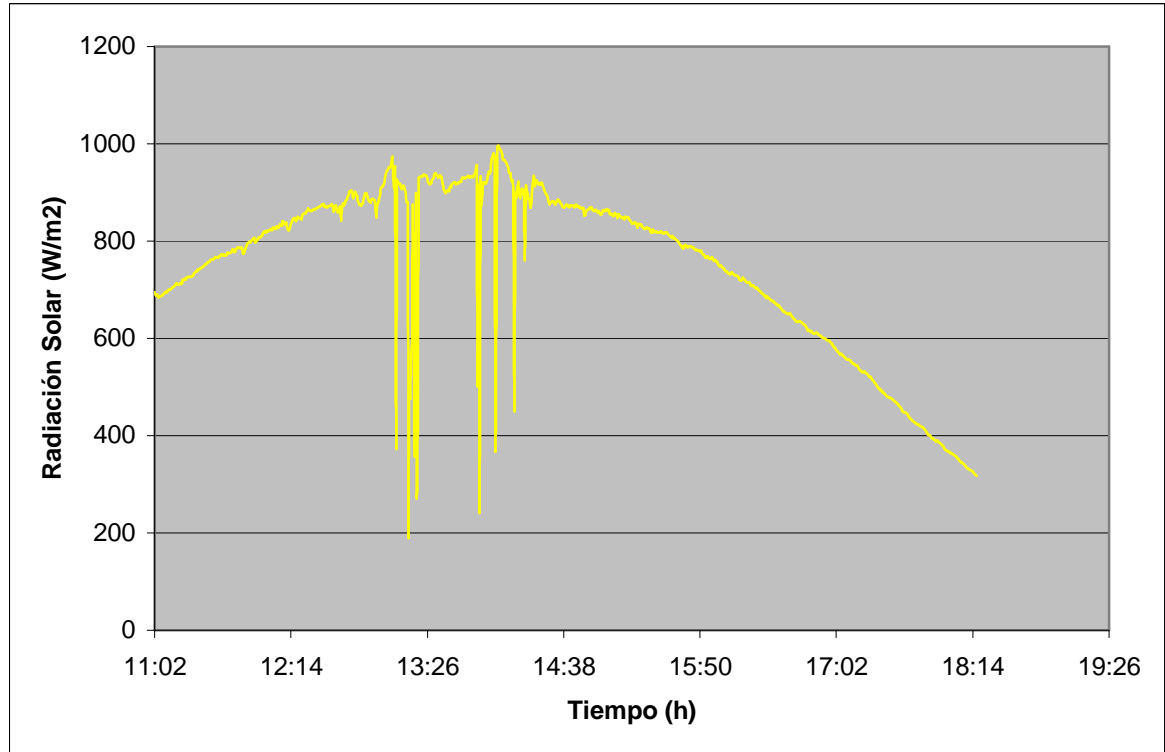


Figura 4.38. Evolución de la irradiancia solar (11 de julio)

La figura 4.39, representa las variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor. La prueba inició a las 11:0 y después de media hora, la temperatura de salida de los captadores y entrada al intercambiador inició con 30 °C, alcanzó un máximo de 54.5 °C (14:30h). Se mantuvo por arriba del los 50 °C, en el período entre las 12:15 y las 17:00h, siendo la operación mayor de 40 °C, entre las 11:20 y las 18:15h. Con relación a la temperatura de salida del intercambiador y entrada a los captadores, la temperatura se mantuvo por arriba de 40 °C entre las 11:30 y las 18:15, con un valor máximo de 50.6 °C (14:11). Durante cerca de 2.5 h, la temperatura se mantuvo entre 49.45 y 49.9 (13:55 – 16:20).

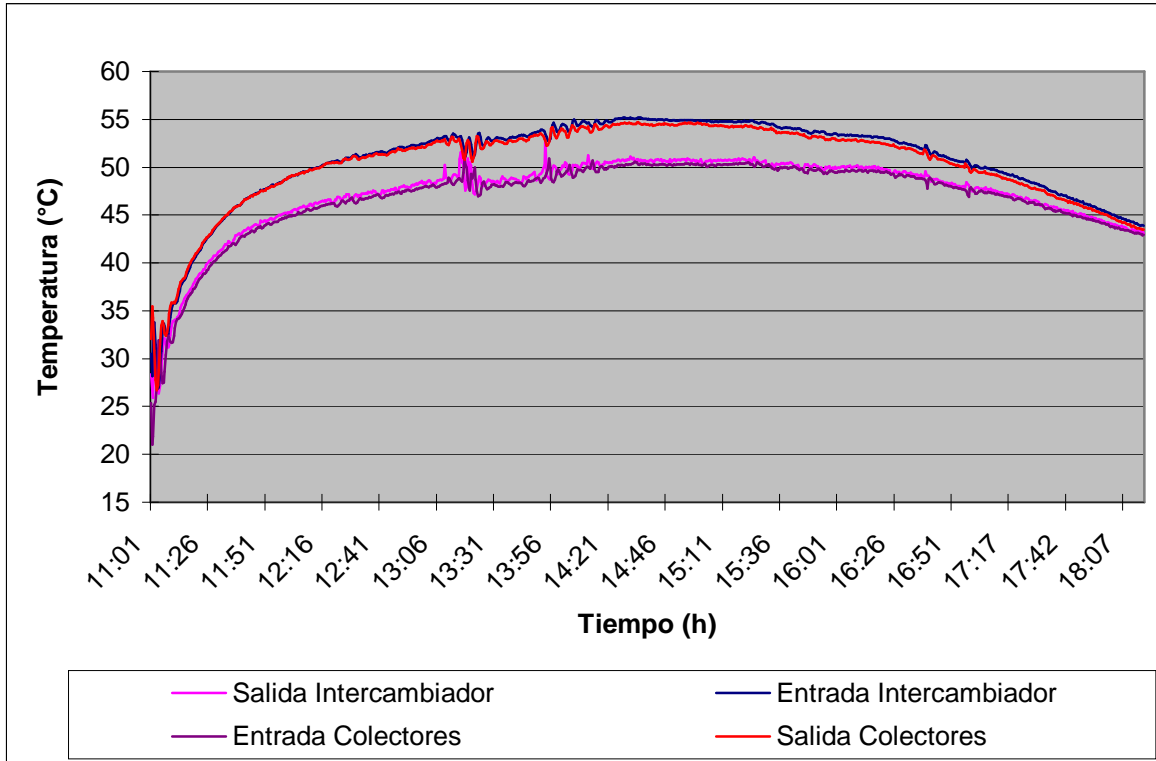


Figura 4.39. Variaciones de la temperatura del agua en el campo de captadores solares y en el intercambiador de calor (11 de julio)

La diferencia en temperaturas entre las condiciones de entrada y salida del intercambiador varió entre 2 y 5 °C, manteniéndose entre 3 y 5 °C, durante el período entre las 11:30 y 17:30, debido principalmente a la extracción casi constante de calor por parte del aire, disminuyendo este intervalo hacia el final del día.

La figura 4.40, presenta las variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la irradiancia solar.



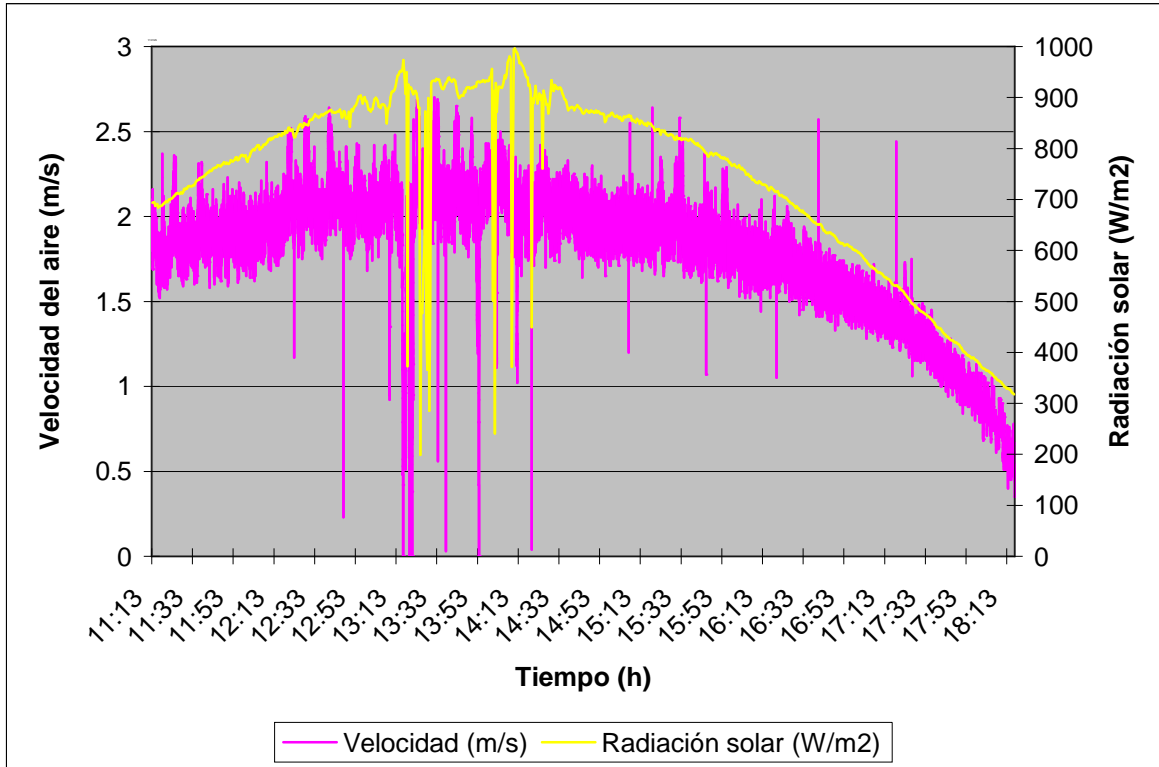


Figura 4.40. Variaciones de la velocidad del aire al interior del túnel y de la irradiancia solar (11 de julio)

La figura 4.41, muestra la variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel. Como se aprecia, la humedad relativa inicial del aire fue alta del orden del 53% (11:28h) y una vez dentro del túnel descendió primeramente hasta 44.4% (12:15h) y después rápidamente hasta un valor de 31.7%, para después mantenerse en un intervalo entre un 20 y 30% (12:50 – 18:00h) y casi constante entre 23.6 y 23.8% entre las 14:35 y las 17:15h. Al final de la prueba la humedad se elevó a 31.8% (18.15h).

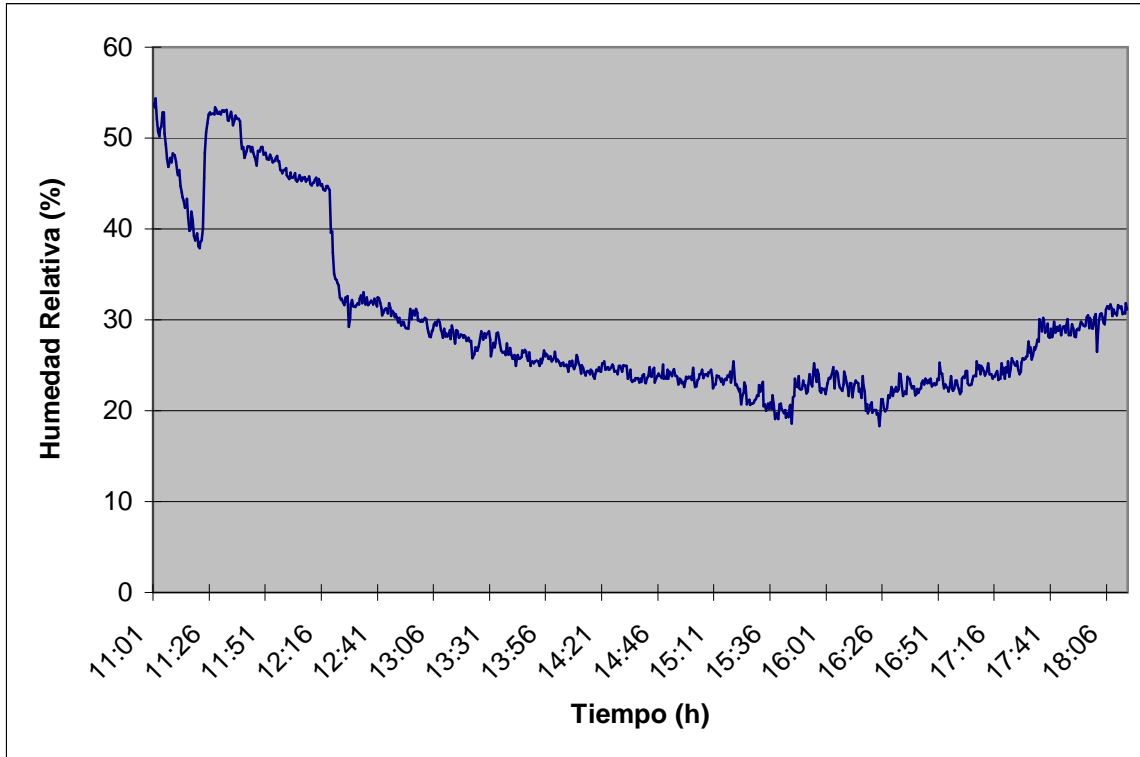


Figura 4.41. Variación de la humedad relativa del aire al interior del túnel (11 de julio)

En la figura 4.42, muestra las variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones. Como se puede observar, la temperatura más alta se registró en la sección I, en donde se inició a una temperatura de 28 °C, obteniéndose una temperatura máxima de 46.6 °C (15:20h) y se mantuvo por arriba de los 40 °C, en el período entre las 11:45 y las 18:15h. En la sección II, se mantuvo una temperatura superior a los 40 °C, durante el período entre las 12:44h y las 18:15h, alcanzándose un máximo de 45 °C. y en la sección III, de las 14:30 a las 17:30h. En la sección IV, se mantuvo por arriba de los 35 °C, entre las 13:00 y las 17:45, con un valor máximo de 38.2 °C. El nivel más bajo de temperatura se registró en la sección V, en donde el intervalo fue entre 30 °C (12:00h) y de las 14:25h se mantuvo por arriba de los 35 °C, hasta las 18:00h, en donde se alcanzó un máximo de 36.8 °C. En la sección VI, se observó un comportamiento regular, aunque con niveles de temperatura más altos que en los de la sección V, en esta sección se tuvieron valores mayores a los 35 °C en el período entre las 13:00 y 18:00h, con un valor máximo de 38.8 °C.

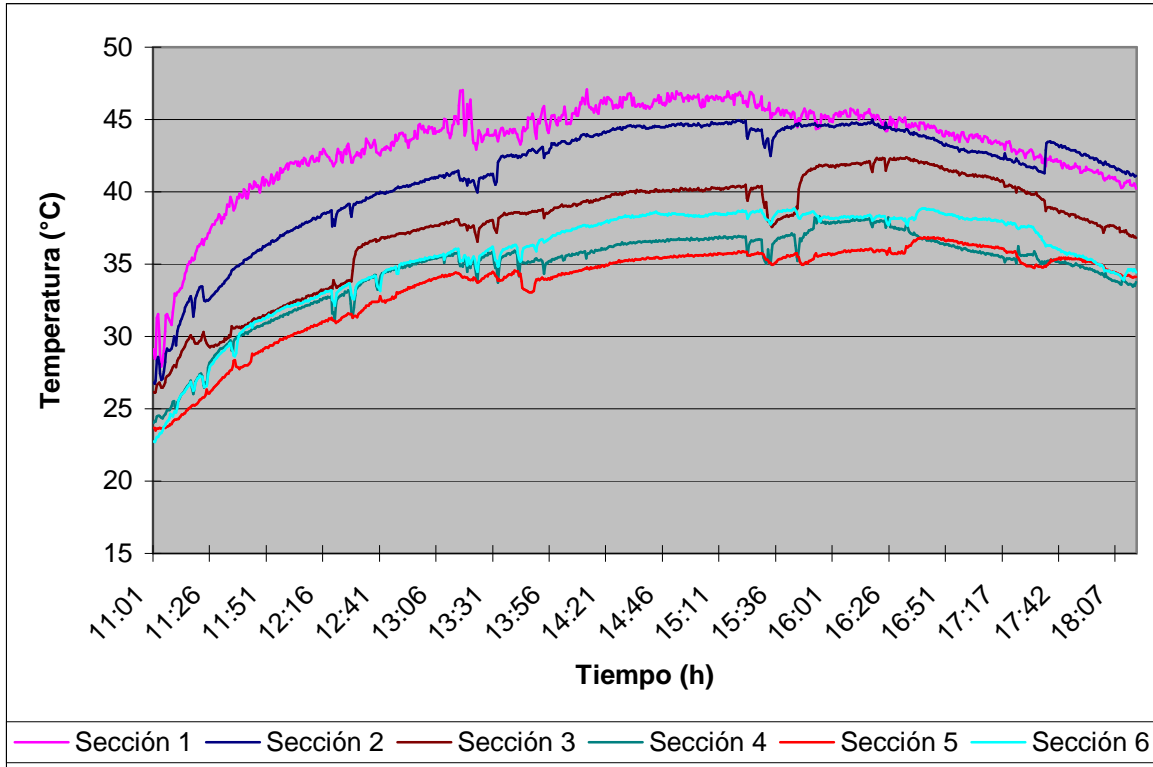


Figura 4.42. Variaciones de las temperaturas al interior del túnel de secado para cada una de las seis diferentes secciones (11 de julio)

En la figura 4.43, se presentan las variaciones del contenido de humedad en el grano, durante el día de prueba, es decir las curvas operacionales de secado para cada una de los niveles considerados, en donde se calculan los grados de humedad extraídos por el aire en función del tiempo. En esta experiencia sólo se determinó el contenido de humedad en el grano, en cierto número de niveles (charolas), en particular en los primeros y últimos de manera alternada en cada sección, es decir, en el nivel III de la sección I, en el nivel I de la sección II, en el nivel III de la sección III, en el nivel I de la sección IV, en el nivel III de la sección V y finalmente en el nivel I de la sección VI. Las humedad inicial varió entre un 28 y 17.5% y el proceso de secado de arroz se realizó en diferentes períodos, debido a que en algunos niveles se alcanzaron las condiciones de diseño, es decir humedades menores al 13%, en este caso la duración del proceso fue de 4 horas, en algunos casos de 6h y en la mayoría de 7h.

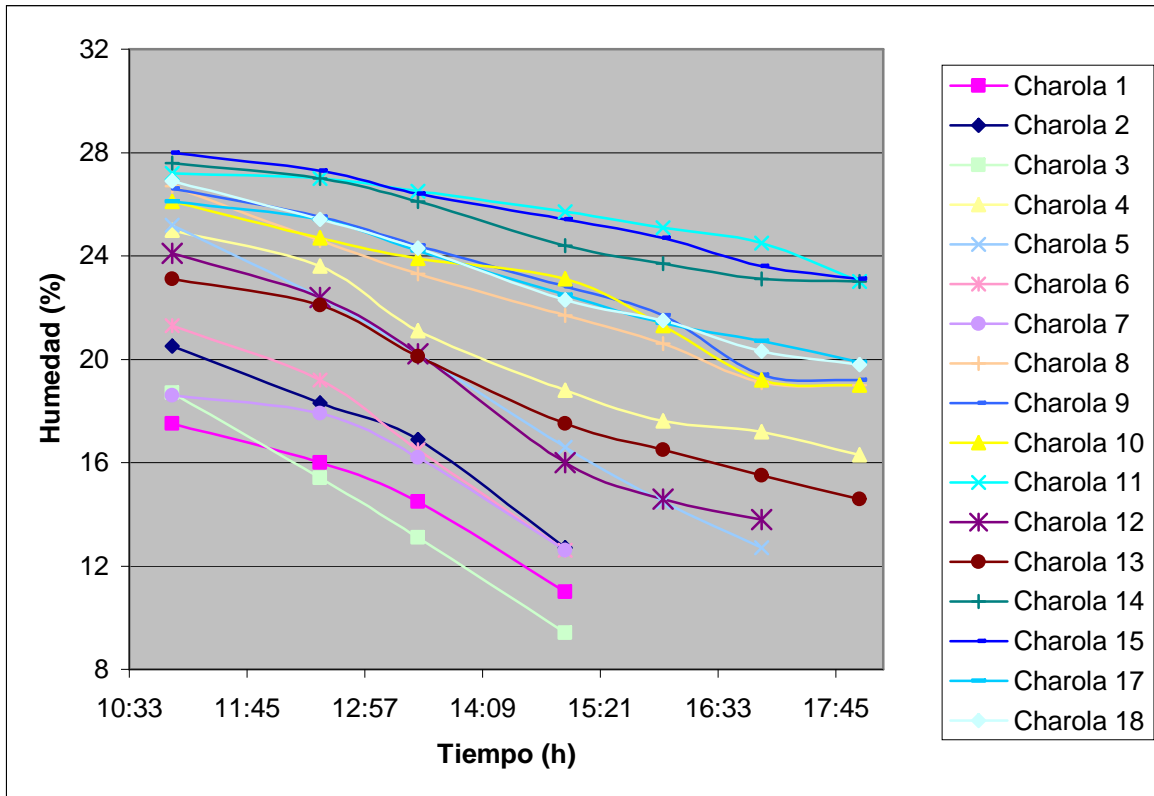


Figura 4.43. Variaciones del contenido de humedad en el grano (11 de julio)

Como se puede observar la velocidad de secado más alta se registro en el nivel III de la primera sección con 2.3 grados de humedad/h, y la más baja de 0.58 en el nivel II de la sección IV. Las velocidades en este día de prueba fueron más bajas debido a que las humedades iniciales fueron mas bajas, teniendo una mayor resistencia a la extracción de la humedad. El resto de las velocidades en las diferentes secciones oscilaron entre valores de 2.08 a 0.64 grados de humedad por hora.

#### Cálculo de las velocidades de secado en grados de humedad por hora

A partir de los datos de las figuras: 4.31, 4.37 y 4.43, se cálculo la velocidad de secado en grados de humedad por hora, para cada uno de los diferentes niveles de cada una de las secciones correspondientes. En la tabla 4.2, se presentan los valores de las velocidades así como el intervalo de humedades conseguido en cada una de las charolas, para cada uno de los días de prueba. En lo general se puede observar que la velocidad disminuye a medida que aumenta la longitud el secador, sin embargo no hay una tendencia con respecto a la ubicación de los niveles. En la figura 4.37, es notorio el comportamiento de la velocidad en el primer nivel de la sección cuatro, sin embargo, se puede explicar por el bajo contenido de humedad inicial, el cual se asemeja a los resultados obtenidos en el nivel III de la sección seis y en el nivel II de la sección III, en donde al parecer la cinética es mas lenta a medida que la humedad inicial es más

baja. Lo anterior se constata, con los resultados obtenidos en la figura 4.43, en donde las velocidades son menores que en el día anterior de prueba.

**Tabla 4.2. Velocidades de deshidratación en grados de humedad por unidad de tiempo en los diferentes niveles (charolas) de cada una de las secciones del túnel de secado para los diferentes días de prueba. (5, 10 y 11 de julio de 2007)**

		<b>SECCIÓN (5 de julio)</b>					
<b>NIVEL</b>		I	II	III	IV	V	VI
I		-----	2.11 (31.9-9.2)	-----	1.48 (31.9-3.0)	-----	1.4 (30.6-2.2)
II		-----	-----	-----	-----	-----	-----
III		2.61 (27-11.3)	-----	2.2 (31.9-8.7)	-----	1.18 (30.1 -23)	-----

		<b>SECCIÓN (10 de Julio)</b>					
<b>NIVEL</b>		I	II	III	IV	V	VI
I		4.12 (41.5-20.9)	2.32 (37.3-25.7)	3.38 (37.3-20.4)	1.7 (35-26.5)	3.22 (41.2-25.1)	
II		3.66 (41.9-23.6)	3.38 (39.3-23.6)	2.1 (37.3- 26.8)	2.32 (39.3-27.7)	2.64 (41.5-28.3)	2.62 (39.9-26.8)
III		3.78 (39.3-20.4)	3.38 (40.1-23.2)	2.48 (39.6-27.2)	2.2 (41.7-25.2)	2.60 (41.3-28.3)	1.64 (35-26.8)

		<b>SECCIÓN (11 de julio)</b>					
<b>NIVEL</b>		I	II	III	IV	V	VI
I		1.62 (17.5-1.00)	1.24 (25.0-16.3)	1.5 (18.6-12.6)	1.01 (26.1-19)	1.21 (23.1-14.6)	
II		1.95 (20.5-12.7)	2.08 (25.2-2.7)	1.12 (26.9- 19)	0.58 (27.2-23.1)	0.64 (27.6-23.1)	0.9 (26.1-19.8)
III		2.30 (18.6-9.4)	2.17 (21.3-12.6)	1.1 (26.9-9.2)	1.71 (24.1-13.8)	0.71 (28.0-23.0)	1.01 (26.9-19.8)

## CONCLUSIONES

El diseño, construcción, instrumentación y el estudio experimental preliminar del sistema de calentamiento solar indirecto de aire, el cual se integró a un secador solar combinado (térmico-fotovoltaico) se basó, primeramente en el estudio experimental sobre la cinética de secado de arroz y en la obtención del dominio de temperaturas y velocidades de viento así como espesor de grano óptimos para el procesamiento del grano.

El funcionamiento del sistema fotovoltaico para la operación de los componentes eléctricos fue satisfactorio, ya que fue posible el funcionamiento del ventilador en forma directa durante la operación diurna y las variaciones de la velocidad del aire, en función de la radiación solar estuvieron en el dominio requerido para las condiciones de acondicionamiento de la cámara de secado. Sin embargo, debido a la relación de las secciones de flujo de aire entre el ventilador y el túnel, hubo un decaimiento muy grande de la velocidad, por lo que es necesario aumentar la longitud del difusor por lo menos al doble y obtener un dominio de velocidades más altas, sin embargo, a pesar de lo anterior, se lograron las condiciones de diseño.

Las mediciones de los parámetros eléctricos del motor durante la operación con los módulos fotovoltaicos mostraron un alto consumo de energía, por lo que se debe de instalar un motor más eficiente, con el objeto de ahorrar energía solar fotovoltaica.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un sistema solar para el calentamiento indirecto de aire e integrarlo a una cámara de secado. Los primeros resultados experimentales fueron satisfactorios, ya que permitieron establecer condiciones de temperatura en un dominio entre 35 y 45 °C, durante períodos entre 4 y 5 h. El dominio de operación se estableció con flujos de 40, 50 y 60 l/h de agua circulando a través del campo de captadores solares, seleccionándose el de 50 l/h como el más adecuado para el intercambio aire-agua. Debido al diseño de los diferentes subsistemas, fue posible el desarrollo de los tres diferentes modos de funcionamiento. Estas condiciones de operación están de acuerdo a las especificaciones de diseño.

Aunque no fue un compromiso inicial del presente trabajo, se desarrollaron algunas pruebas preliminares de secado de arroz, en donde se dificultó la operación de la re-hidratación controlada, debida a la cantidad de grano a tratar, por lo que se efectuó a temperatura ambiente, produciendo grano de diferentes humedades, debido a la estructura propia de los diferentes granos de diferentes orígenes y principalmente al problema de escurrimiento, ocasionando variaciones en la humedad inicial.

Se constató que la velocidad de secado disminuía a lo largo de la cámara y que a medida que la humedad inicial era mayor, la velocidad de secado aumenta. Las velocidades de secado obtenidas durante los días de prueba, se establecieron en un dominio entre 4 y 0.6 grados de humedad extraídos por cada hora de operación, dentro de los dominios establecidos de humedad final, es decir entre un 19 y 18% de humedad final en la primera etapa y de un 13 a 14% de humedad al

final del proceso. Se considera que para el dominio de humedades obtenidos en el grano, a las condiciones de operación establecidas, se tendrá una velocidad de secado entre 1 y 2.5 grados de humedad por hora. A pesar de los resultados satisfactorios, se espera que la distribución de humedad así como las velocidades de secado varíe una vez que se procese el grano de arroz recién cosechado.

Se considera además que las mejoras propuestas, aumentarán la eficiencia global del sistema, obteniéndose una mayor velocidad de aire por el mismo consumo energético, reduciendo el tiempo de secado y preservando la calidad del producto, obteniendo con este proceso una mayor recuperación de granos enteros.

Además cabe mencionar que, debido al carácter modular del sistema solar, tanto de los captadores solares como del sistema fotovoltaico, este puede aumentar en la medida que aumenta la demanda de energía y el carácter autónomo le permite operar en regiones aisladas en donde se carezca de infraestructura energética. Sin embargo, el agua caliente se puede obtener a partir de la combustión de desechos agrícolas como energía auxiliar a la operación del secador solar.

#### Recomendaciones

1. Medir la velocidad del aire a la salida del difusor y en su caso aumentar la distancia del difusor
2. Modificar la apertura de puertas
2. Seleccionar un motor más eficiente
3. reorientar las charolas
4. buscar un sistema de medición de la humedad contenida en el aire de manera continua.
- 5 aumentar la capacidad de bombeo par aumentar la velocidad del agua al interior del intercambiador.

# BIBLIOGRAFÍA

[1] Isaac Pilatowsky F., análisis técnico económico del secado de arroz mexicano producido en el estado de Morelos.

[2] FAO (organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación) Secretaría del Año Internacional del Arroz, Documento de base, octubre 2003

[3] Ángel Fálder Rivero, Enciclopedia de los alimentos. Distribución y consumo, Año nº 13, Nº 68, 2003, pags. 127-133

[4] Revista "Claridades Agropecuarias" revista número 5 (enero 1994) Revista mensual producida y editada por Apoyos y Servicios a la comercialización Agropecuaria, Órgano Desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Director en Jefe: Lic. José I. Portillo González

[5] Gutiérrez Díaz J. L., Kurokawa Y., 1993, Postcosecha de arroz en el estado de Morelos, Publicación especial No. 9, CEZACA, SARH, Zacatepec Morelos, México.

[6] Finck Pastrana A., 2000, Notas de actualización en Energía Solar 2000, Secado solar, Centro de Investigación en Energía, Temixco Morelos, México.

[7] José Antonio Marques Pereira y Daniel Marcal de Queiroz, Principios de secado de granos psicometría higroscopia, Serie: Tecnología Poscosecha 8, Oficina regional de la FAO para AMÉRICA LATINA y el CARIBE Santiago, Chile 1991

[8] Ekechukwy O.V., 1997, Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy Conversion & Management 40 (1999)

[9] S Gunasekaran., Optimal energy management in grain drying. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1986;25(1):1-48.

[10] Marcal de Queiroz, D. y J.A. Marques-Pereira, Principios de secado de granos, psicometría e higroscopia, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile, (1991)

[11] Mulero A., Curso de termodinámica y termotecnia. Escuela de ingenierías agrarias Universidad de Extremadura, España (2006).



- [12] Grain storage techniques Evolution and trends in developing countries. Editado por D.L. Proctor, FAO Consultant, (1994)
- [13] Marques Pereira J. A. , Marcal de Queiroz D., Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas, oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago, Chile 1991
- [14] Arinze EA, Schoenau G, Bigsby FW. Solar-energy absorption properties of some agricultural products. ASAE paper, no. 79-3071, 1979.
- [15] O. V. Ekechukwu O. V., Norton B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion & Management 40 (1999) pag. 615-655
- [16] O. V. Ekechukwu O. V., Norton B. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collector for crop drying applications. Energy Conversion & Management 40 (1999) pag. 657-667
- [17] Víctor Manuel Cadena Cedillo, Evaluación experimental e integración de un sistema fotovoltaico para la operación de un sistema solar termohidrónico para el secado de granos. Tesis, Ing. Mecánica, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM, febrero 2007.
- [18] Sandra Patricia Escobar Oseguera, Metodología para el estudio experimental de la cinética de secado de productos alimenticios; el deshidratador de mangote la variedad "Ataulfo". Instituto Tecnológico de Tapachula, Chiapas, Proyecto de Residencia Profesional, junio-agosto 2006.
- [19] Marlene Verdugo Dardon, Estudio experimental de un dispositivo de laboratorio para la determinación de las condiciones óptimas del proceso de secado de granos alimenticios: caso particular; el arroz palay. Instituto Tecnológico de Tapachula, Chiapas, Proyecto de Residencia Profesional, junio-agosto 2006.
- [20] R.Best, W.Soto, I.Pilatowsky and J.L Gutiérrez, ( 1994), " Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump", Renewable Energy, 5, 1,465-468.
- [21] J. Marín Cruz Gómez (1998), " Aplicación de la bomba de calor por compresión mecánica y de la energía solar en el secado de arroz", Tesis, Ingeniería electromecánica, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos, México.
- [22] Oskam A. , Best R. , Marincic I., (1995) "Desarrollo de un Colector Solar Plano para el Calentamiento de Aire para Aplicaciones Múltiples en Procesos de Secado" Publicada en las Memorias de la XIX Semana de Energía Solar, La Paz , B.C.S. 3-6 de octubre de 1995, Volumen 1 , pages 35-38

[23] Finck A., Oskam A., Best R., (1998) "Secador Solar Portátil de Usos Múltiples" Publicada en las memorias de la XXII Semana Nacional de Energía Solar en Mexicali, B.C. del 31 de septiembre al 2 de octubre, 1998. Volúmen 1, pags 436-441

[24] I.Pilatowsky, J.Vázquez, R.Bravo y A.Finck, (1999), "Análisis experimental de un sistema solar termohidróónico a convección natural para el calentamiento de aire", pags. 625-629 memorias de la XXIII Reunión Nacional de Energía Solar, 1999, Morelia, Michoacán.