

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**SISTEMA HÍBRIDO
TERMOSOLAR-EÓLICO PARA LA
CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS
AGROPECUARIOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRA EN MATERIALES Y
SISTEMAS ENERGÉTICOS
RENOVABLES**

PRESENTA:
GUADALUPE PAVÓN GOMEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOEL PANTOJA ENRÍQUEZ





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
09 de junio de 2015
Oficio No. DIP-263/2015

C. Guadalupe Pavón Gómez
Candidata al Grado de Maestra
en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables
Presente.

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo de tesis denominado **“Sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios.”** y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Maestra en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

“Por la Cultura de mi Raza”

Dra. María Adelina Schlie Guzmán
Directora.



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

C.c.p. Expediente

Dedicatoria

A mis padres por el cariño y apoyo incondicional que me han brindado en todo momento.

A mis hermanos por la paciencia y cariño, por motivarme a seguir preparándome profesionalmente.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo económico para la realización de los estudios de Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, UNICACH, por el servicio y prestación de las instalaciones.

Al proyecto “Uso integral de fuentes renovables de energía en comunidades de alta marginación en Chiapas”, AECID, por el financiamiento para la construcción del sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios.

Al Dr. Joel Pantoja Enríquez por la asesoría, apoyo, atención, dedicación y paciencia.

A los miembros del comité tutorial: Dr. Joel Pantoja Enríquez, Dr. Guillermo Ibáñez Duharte, Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz, por sus valiosas aportaciones para el mejoramiento de este trabajo.

A los catedráticos del CIDTER, por compartir su conocimiento y experiencia.

A todos los compañeros que me apoyaron, aconsejaron y alentaron para continuar.

Índice general

Dedicatoria	
Agradecimientos	
índice general	I
índice de figuras	IV
índice de tablas	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Definición del problema	6
1.4. Objetivos	7
1.5. Justificación	7
1.6. Conclusión	8

Capítulo 2. Fundamentos

2.1. Introducción	9
2.2. Fundamentos de secado solar	10
2.2.1. Proceso de secado	10
2.2.1.1. Contenido de humedad	10
2.2.1.2. Humedad de equilibrio	11
2.2.1.3. Balance de materia	11
2.2.1.4. Balance de energía	11
2.2.1.5. Velocidad de secado	13
2.2.1.6. Tiempo de secado	14
2.2.2. Períodos de secado	15
2.2.2.1. Período de velocidad constante	16
2.2.2.2. Período de velocidad decreciente	17
2.2.3. Tecnología de secado solar	17
2.2.3.1. Clasificación de secadores solares	18
2.2.3.1.1. Sistemas de secado solar pasivos	19
2.2.3.1.1.1. Secadores solares pasivos directos	19
2.2.3.1.1.1.1. Secador solar pasivo tipo gabinete	21

Índice general

2.2.3.1.1.1.2. Secador solar pasivo tipo invernadero	21
2.2.3.1.1.2. Secadores solares pasivos indirectos	22
2.2.3.1.1.3. Secadores solares pasivos mixtos	23
2.2.3.1.2. Sistemas de secado solar activo	23
2.2.3.1.2.1. Secadores solares activos directos	23
2.2.3.1.2.2. Secadores solares activos indirectos	24
2.2.3.1.2.3. Secadores solares activos mixtos	25
2.2.3.2. Forma de operación	26
2.3. Colectores solares	26
2.3.1. Colectores de placa plana con cubierta	26
2.3.2. Colectores de placa plana sin cubierta	28
2.3.3. Colectores concentradores parabólicos	29
2.3.4. Colectores de tubos de vacío	29
2.3.4.1. Colectores de flujo directo	30
2.3.4.2. Colectores con tubo de calor	31
2.4. Fundamentos de aerogeneradores	32
2.4.1. Descripción general de un aerogenerador y principio de funcionamiento	32
2.4.2. Tipos de aerogeneradores	32
2.4.2.1. Aerogeneradores de eje horizontal	33
2.4.2.2. Aerogeneradores de eje vertical	33
2.5. Conclusión	35

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema

3.1. Introducción	36
3.2. Metodología para el desarrollo del sistema	37
3.3. Diseño	39
3.3.1. Consideraciones de diseño	39
3.3.2. Bases de diseño	41
3.3.2.1. Cálculo de la energía necesaria para el secado del producto	41
3.3.2.2. Cálculo del flujo de aire	44
3.3.2.3. Cálculo de la superficie de captación solar	46
3.3.3. Dimensiones del sistema	48
3.4. Construcción	49
3.4.1. Materiales y equipos	49
3.4.2. Descripción general del prototipo de sistema híbrido termosolar- eólico	52
3.4.2.1. Cámara de secado	52
3.4.2.2. Estructura general del sistema	53
3.4.2.3. Sistema eólico	54

Índice general

3.4.2.3.1. Cálculo de la demanda de energía eléctrica	54
3.4.2.3.2. Descripción del sistema eólico	54
3.4.2.3.3. Cálculo del número de baterías	56
3.5. Sistema de medición y control	56
3.6. Conclusión	58

Capítulo 4. Funcionamiento y eficiencia térmica del sistema

4.1. Introducción	59
4.2. Funcionamiento	59
4.2.1. Funcionamiento de día	60
4.2.2. Funcionamiento de noche o días nublados	61
4.3. Determinación de la eficiencia térmica del sistema	62
4.4. Conclusión	64

Capítulo 5. Resultados y discusiones

5.1. Introducción	65
5.2. Evaluación en vacío	66
5.2.1. Evaluación con sistema solar (Colectores de tubos de vacío)	66
5.2.2. Evaluación con sistema auxiliar eólico (Resistencias eléctricas)	75
5.2.3. Evaluación del sistema híbrido solar- eólico	76
5.2.3.1. Control de temperatura a 40 °C en la cámara de secado	77
5.2.3.2. Control de temperatura a 50 °C en la cámara de secado	80
5.2.3.3. Control de temperatura a 60 °C en la cámara de secado	83
5.2.3.4. Control de temperatura a 70 °C en la cámara de secado	86
5.3. Evaluación con producto (deshidratación de manzana)	89
5.5. Eficiencia del secador híbrido termosolar-eólico	97

Conclusiones	98
Anexos	100
Bibliografía	110

Índice de figuras

Fig. 1.1. Secador solar tipo invernadero.	3
Fig. 1.2. Secador híbrido gas natural.	4
Fig. 1.3. Deshidratador solar combinado térmico- fotovoltaico.	5
Fig. 1.4. Secador vista lateral este-oeste, con colectores dirigidos al norte.	6
Fig. 2.1. Curvas de período de secado.	16
Fig. 2.2. Clasificación de secadores solares.	19
Fig.2.3. Características de un típico secador solar pasivo directo.	20
Fig. 2.4. Secador solar pasivo tipo gabinete.	21
Fig. 2.5. Características de un típico secador solar pasivo indirecto.	22
Fig. 2.6. Características de un típico secador solar pasivo tipo mixto.	23
Fig. 2.7. Secador solar activo directo tipo invernadero.	24
Fig. 2.8. Características de un típico secador solar activo tipo indirecto.	25
Fig.2.9. Características de un secador solar activo tipo mixto.	25
Fig. 2.10. Esquema de un colector de placa plana con cubierta.	27
Fig.2.11. Esquema de un colector de placa plana sin cubierta.	28
Fig. 2.12. Esquema de un colector concentrado parabólico.	29
Fig. 2.13. Principio de funcionamiento de un aerogenerador.	32
Fig. 3.1. Metodología utilizada para el desarrollo del sistema híbrido termosolar eólico para conservación de productos agropecuarios.	37
Fig. 3.2. Dimensiones del sistema híbrido termosolar eólico para conservación de productos agropecuarios.	49
Fig. 3.3. Cámara de secado.	53
Fig. 3.4. Estructura general del sistema híbrido termosolar-eólico.	53
Fig. 3.5. Energía instantánea generada por el aerogenerador.	55
Fig. 3.6. Sistema de medición y control.	57
Fig. 4.1. Funcionamiento del sistema híbrido durante el día.	60
Fig. 4.2. Funcionamiento del sistema híbrido durante la noche o días nublados.	61
Fig. 5.1. Variación de las temperaturas en un período de 90 horas en función de la radiación solar.	67
Fig. 5.2. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 90 horas.	68
Fig. 5.3. Variación de la velocidad del viento en un período de 90 horas.	69
Fig. 5.4. Variación de las temperaturas en un período de 67 horas en función de la radiación solar.	70
Fig. 5.5. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 67 horas.	71
Fig. 5.6. Variación de la velocidad del viento en un período de 67 horas.	72
Fig. 5.7. Variación de las temperaturas en un período de 72 horas en función	

Índice de figuras

de la radiación solar.	73
Fig. 5.8. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 72 horas.	74
Fig. 5.9. Variación de la velocidad del viento en un período de 72 horas.	75
Fig. 5.10. Variación de la temperatura en la cámara de secado con el sistema auxiliar.	76
Fig. 5.11. Control de la temperatura en la cámara de secado a 40 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.	78
Fig. 5.12. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 29 al 30 de enero de 2015.	79
Fig. 5.13. Variación de la velocidad del viento del 29 al 30 de enero de 2015.	80
Fig. 5.14. Control de la temperatura en la cámara de secado a 50 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.	81
Fig. 5.15. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 27 al 28 de enero de 2015.	82
Fig. 5.16. Variación de la velocidad del viento del 27 al 28 de enero de 2015.	83
Fig. 5.17. Control de la temperatura en la cámara de secado a 60 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.	84
Fig. 5.18. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 8 al 9 de febrero de 2015.	85
Fig. 5.19. Variación de la velocidad del viento del 8 al 9 de febrero de 2015.	86
Fig. 5.20. Control de la temperatura en la cámara de secado a 70 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.	87
Fig. 5.21. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 12 al 13 de febrero de 2015.	88
Fig. 5.22. Variación de la velocidad del viento del 12 al 13 de febrero de 2015.	89
Fig. 5.23. Variación de la humedad en las muestras de manzana en el tiempo a tres temperaturas.	90
Fig. 5.24. Control de la temperatura a 50°C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.	91
Fig. 5.25. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 50 °C.	92
Fig. 5.26. Control de la temperatura a 60°C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.	93
Fig. 5.27. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 60 °C.	94
Fig. 5.28. Control de la temperatura a 70°C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.	95
Fig. 5.29. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad	

Índice de figuras

relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 70 °C.	96
Fig. 5.30. Eficiencia térmica diaria del secador híbrido termosolar-eólico para diferentes temperaturas en la cámara de secado.	97
Fig. A1. Imagen de la vista frontal del sistema híbrido termosolar eólico.	100
Fig. A2. Imagen de la Vista trasera del sistema híbrido termosolar eólico.	100
Fig. A3. Imagen de la vista lateral derecha del sistema híbrido termosolar eólico.	101
Fig. A4. Imagen de la Vista lateral izquierda del sistema híbrido termosolar eólico.	101
Fig. A5. Clasificación y selección de la manzana.	104
Fig. A6. Inmersión de la manzana para acondicionamiento en ácido cítrico.	104
Fig. A7. Escurrido de manzana.	105
Fig. A8. Llenado de bandejas para la deshidratación de manzana.	105
Fig. A9. Deshidratación de manzana.	106

Índice de tablas

Tabla. 3.1. Características y requerimientos extremos de los productos a procesar en el secador solar.	39
Tabla. 3.2. Potencial energético solar y eólico disponible en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	40
Tabla. 3.3. Condiciones de parámetros externos útiles para la realización de los cálculos de las bases de diseño.	40
Tabla. 3.4. Bases de diseño.	48
Tabla. 3.5. Materiales para la construcción del secador solar y de la estructura de soporte de los colectores solares.	49
Tabla. 3.6. Consumos de los componentes eléctricos del sistema termosolar-eólico.	54
Tabla. 3.7. Características técnicas del aerogenerador Whisper 100.	54
Tabla. A1. Peso de las muestras antes y después de su deshidratado en el secador híbrido termosolar-eólico.	107
Tabla. A2. Peso de las muestras antes y después de su deshidratación a temperatura controlada de 100°C.	108

Resumen

En este trabajo, se presenta el diseño y construcción así como la evaluación de un sistema híbrido termosolar- eólico para la conservación de productos agropecuarios. Para la construcción se consideró la demanda energética, energía disponible, entre otras variables de diseño y la zona donde se instaló el sistema (para determinar la inclinación y orientación de la superficie captadora). Se determinó las dimensiones del sistema híbrido, se seleccionó los materiales y equipos para su implementación. El sistema está compuesto por un subsistema de calentamiento termosolar, un subsistema eólico y un subsistema de medición y control, lo que permite mantener las 24 horas del día, condiciones estables de trabajo; el primero de ellos integrado por colectores solares de tubos al vacío, un termo-tanque, un intercambiador de calor, 1 ventilador, 1 extractor de aire y una bomba de recirculación; el segundo integrado por un aerogenerador, un banco de baterías, y un inversor; los cuales trabajan de la siguiente manera: los colectores captan la radiación solar para calentar un fluido (agua), que se almacena en el termo-tanque y a través del intercambiador de calor se transfiere el calor del fluido a la cámara de secado, mientras que la energía generada por el aerogenerador se utiliza para el funcionamiento del ventilador, el extractor, la bomba de recirculación de agua y el subsistema de medición y control, además suministra una parte de energía térmica a la cámara de secado a través de 2 resistencias eléctricas. La evaluación se realizó en vacío y con carga con diversas condiciones de operación y se determinó la eficiencia del sistema.

Abstract

In this work, presents the design, construction and evaluation of a solar thermal-wind hybrid system for the conservation of agricultural products. For construction of the system was considered energy demand, available energy, others design variables and the area where the system was installed (to determine the inclination and orientation of the catchment surface). The dimensions of the hybrid system were determined and selected materials and equipment for its implementation. The system is composed by a solar thermal heating subsystem, a wind subsystem and a measurement and control subsystem, thus keeping 24-hour stable working conditions; the first one composed of solar vacuum tube collectors, a thermal storage tank, a heat exchanger, 1 fans, 1 extractor of air and a water circulation system; the second consisting of a wind turbine, a battery bank and an inverter; which work as follows: the capture solar radiation collectors for heating a fluid (water) which is stored in a thermal storage tank and the heat in the fluid is transferred to the drying chamber through the heat exchanger, while the energy generated by the wind turbine is used for the operation of the fan, extractor and the water circulation system, and the measurement and control subsystem also provides a portion of the thermal energy to the drying chamber through two electrical resistances. The evaluation was conducted in vacuum and charged with various operating conditions and the efficiency of the system was determined.

Capítulo 1. Generalidades.

1.1. Introducción.

La energía solar y la energía eólica, son dos de las energías renovables consideradas desde 1970 una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación), así como por su menor impacto ambiental. A partir del año 1971 al 2000, la energía solar y eólica tuvieron un crecimiento de 32.6 % y 52.1 % anual respectivamente [1].

En México ya se cuenta con algunos años de experiencia en la implementación de equipos solares y eólicos, está posicionado como el segundo país de Latinoamérica con plantas eólicas instaladas. En la actualidad ya existen instituciones dedicadas a la investigación y desarrollo de estos sistemas. Nuestro país cuenta tanto con recurso solar como eólico disponible lo cual permite adaptar estas tecnologías además de que ya existe un desarrollo tecnológico muy importante para el mejoramiento de la calidad y durabilidad de estos sistemas solares y eólicos, buscando esto se ha dado paso al desarrollo de los llamados sistemas híbridos los cuales presentan un gran avance en la tecnología de las fuentes renovables de energía.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios el cual está alimentado por dos fuentes de energías la energía solar y eólica. La combinación de estas dos fuentes de energía se presentó como una alternativa a la problemática que presentan los sistemas térmicos-solares (secadores) debido a la falta de energía solar durante la noche o días nublados y que radica principalmente en la disminución del rendimiento del sistema y por consecuencia pérdida en la calidad del producto que se procese en él.

1.2. Antecedentes.

La energía solar ha sido utilizada en sistemas térmico-solares para el proceso de secado de productos, por ser una fuente de energía limpia; sin embargo presenta algunas desventajas: como es el hecho de que sólo puede ser utilizada 8 horas en promedio por día y que depende de las condiciones climatológicas, por la misma razón, se aumenta la temperatura de operación en los secadores solares, ya que de esta manera se reducen los tiempos de secado del producto, en busca de la mayor calidad en el producto en investigaciones se cita la importancia del flujo de aire en el secador. Por ejemplo Smith [2] y Hua [3], coinciden sobre la importancia del flujo de aire en este caso de un secador solar para madera, indicando que un flujo uniforme tiene como resultado un secado homogéneo y por ende un producto de mayor calidad.

Con el paso del tiempo y el desarrollo tecnológico se ha buscado alternativas para la mejora de estos dispositivos, en algunos trabajos se han adaptado en los secadores solares 2 fuentes de energía para garantizar los tiempos de secado, desarrollando así secadores solares híbridos.

En este apartado se hará una revisión del desarrollo de estos dispositivos, partiendo del trabajo de Ignacio [4], quien plantea el diseño de un secador híbrido para madera aserrada el cual utiliza la energía solar mediante colectores solares y la energía calorífica del agua obtenida de un secador convencional esto para garantizar un secado correcto en días nublados, lluviosos o por la noche; es decir que el contenido de humedad en toda la carga sea homogénea, lo cual plantea que se puede lograr con un flujo y velocidad de aire uniforme en el interior de la carga. En busca de lo anterior Ignacio, modifica la geometría del secador, la velocidad del aire y la colocación de los dispositivos, desarrollando un secador de forma rectangular con esquinas superiores redondeadas, con ventiladores colocados en la parte superior central y además se le adicionan calentadores en forma horizontal. De esta manera logra una velocidad de aire uniforme que circula entre la carga obteniendo un secado homogéneo.

En Australia (Haque, 2006) [5]; se ha propuesto el uso de secadores con estructura tipo invernadero que es esencialmente un compartimiento rectangular pintado de negro

Capítulo 1. Generalidades.

mate con hojas acanaladas de hierro las cuales usa como colector, una estructura tipo invernadero con una cubierta plástica transparente (fig.1.1). Cuenta con un sistema de calefacción adicional durante días nublados. Además realiza un monitoreo con sensores mediante un sistema de adquisición de datos, para obtener los valores del flujo aire y temperatura en el secador y compararlas con las condiciones ambientales.



Figura 1.1. Secador solar tipo invernadero (Haque, 2006).

La empresa Solar Dryers Australia Pty Ltd [6], desarrolló un secador híbrido (solar-gas natural) construido con estructura de aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado (fig. 1.2). Utiliza la energía de la combustión del gas natural para calentar el agua que pasa por radiadores dentro de la cámara y sólo utiliza la energía solar para calentar el agua por medio de colectores colocados en la parte superior del secador. Tiene una capacidad de 10 m³, requiere energía eléctrica de 240 V para operar los ventiladores y tiene una cámara de secado de forma rectangular, sin embargo, no presenta información sobre el tiempo de secado, así como del funcionamiento de los dispositivos.



Figura 1.2. Secador híbrido solar gas natural, ([http:// www.rosegum.com.au/10m.htm](http://www.rosegum.com.au/10m.htm)).

Gama [7], hace el análisis teórico-experimental de un deshidratador solar combinado (Térmico- Fotovoltaico) para el tratamiento de arroz, el cual utiliza de forma combinada la energía solar en su conversión térmica y fotovoltaica (fig. 1.3). Este secador solar puede operar durante el día, a través de la circulación de agua que es calentada en un banco de captadores solares de placa plana y conducida a través de un intercambiador en donde de manera indirecta calienta el aire necesario para el acondicionamiento del túnel de secado. Para la operación nocturna, el agua caliente, en lugar de circularse hacia el túnel de secado, se almacena en un termotanque. 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. La energía eléctrica necesaria para la operación de los componentes eléctricos es suministrada por un sistema fotovoltaico.



Figura 1.3. *Deshidratador Solar Combinado Térmico-Fotovoltaico, Vista frontal del túnel de secado, (Gama, 2007).*

Durán [8], presenta el diseño de un secador solar híbrido de escala industrial. El equipo, ubicado en San Carlos, provincia de Salta, Argentina, está destinado a la producción de pimienta seca.

Cuenta con un banco de colectores que trabajan en serie con un quemador de leña, regulando el funcionamiento día-noche. Durante un día de buena radiación sólo se implementa el funcionamiento del banco de colectores. Durante la noche o en días de escasa radiación, se utiliza el quemador de leña para aumentar la temperatura en la cámara de secado. La superficie total ocupada por el secador es de aproximadamente 345 m², de los cuales el banco de colectores y el caño maestro utilizan 306 m². De estos, 195 m² los ocupan los colectores, mientras que el resto incluye las conexiones y el área de paso (fig. 1.4). A la cámara de secado y al quemador de biomasa les corresponden los 39 m² restantes. Las mejoras en la eficiencia térmica del sistema llevan a una mayor velocidad de secado. Durante los ensayos se midieron las variables de interés en la operación del sistema, que incluyen temperatura ambiente, temperatura de flujo de aire, humedad relativa ambiente y radiación solar sobre un plano horizontal.



Figura 1.4. Secador. Vista lateral este – oeste, con colectores dirigidos al norte.

Deolarte [9], desarrolló un secador solar híbrido para deshidratar productos agropecuarios, el cual está alimentado por energía solar mediante 2 colectores solares planos y energía eléctrica mediante una resistencia eléctrica. El sistema consiste en una estructura metálica recubierta en su exterior con pintura negro mate y dos colectores solares planos laterales. Su funcionamiento es de la siguiente manera; el aire caliente desciende por los colectores y llega a la cámara de secado donde se aumenta la temperatura con una resistencia eléctrica, mientras que un ventilador distribuye de manera uniforme el calor por la cámara de secado.

1.3. Definición del problema.

Los sistemas térmicos solares aprovechan la energía del sol para producir calor, que puede usarse para la producción de agua caliente, conservación de productos agropecuarios o para calefacción; sin embargo por las noches o en los días nublados la radiación solar es casi nula disminuyendo así el rendimiento del sistema. En estos casos la energía solar faltante necesita ser suministrada por otra fuente de energía que mantenga condiciones controlables de trabajo en el equipo.

1.4. Objetivos.

Objetivo general.

- Desarrollar un prototipo de sistema híbrido termosolar-eólico que permita controlar parámetros de secado utilizando la energía solar y eólica.

Objetivos particulares.

- Diseñar un prototipo de sistema híbrido termosolar-eólico.
- Implementar el prototipo de sistema híbrido termosolar-eólico.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo de sistema híbrido termosolar-eólico.

1.5. Justificación.

El sistema híbrido termosolar-eólico representa una opción viable debido a que al trabajar de manera integrada estas dos fuentes de energía nos permite mantener el rendimiento del sistema en todo momento, y a su vez permite tener condiciones controlables de trabajo en el equipo, por lo cual el tiempo de secado del producto que se someta a él será reducido, garantizando altos niveles de calidad en el producto. La energía térmica solar y eólica son energías renovables y hay suficiente potencial energético disponible en la mayor parte de México dando la oportunidad de adaptar tecnologías existentes, contribuyendo al avance del desarrollo tecnológico de estas energías, además al acercar esta tecnología a productores se les da herramientas que contribuyen al desarrollo sustentable de la sociedad.

1.6. Conclusión.

Las investigaciones realizadas se enfocan principalmente en el modelado y en el diseño para garantizar condiciones estables de trabajo en el secador solar, variando la geometría y posición de los dispositivos dentro del secador, pero no se enfocan en la fuente de suministro de energía, al hacer una revisión del estado del arte sobre los sistemas híbridos existentes se observa que en dichos trabajos no se establece una selección óptima de una fuente de energía auxiliar que permita mantener el suministro de energía constante de día y noche y de esta manera tener un flujo de aire caliente uniforme teniendo como resultado un secado homogéneo.

Es importante mencionar que en la actualidad no existe ningún sistema híbrido termosolar- eólico, por lo cual el área de trabajo para el desarrollo de estos tipos de sistemas es muy amplia además de que en la mayor parte del país se cuenta con potencial energético disponible.

Capítulo 2. Fundamentos.

2.1. Introducción.

El secado natural ha sido empleado desde hace tiempo para secar gran variedad de productos. No obstante para la utilización a gran escala este método tiene limitaciones como lo son la necesidad de grandes superficies, costo de mano de obra y dificultad en el control del proceso de secado. Debido a lo anterior se ha realizado en los últimos años el desarrollo de secadores solares, de esta manera se aprovecha los beneficios de la energía solar. De las ventajas que presenta el secado solar, las más destacadas son: fuente de energía no contaminante, renovable y que se puede utilizar a escala local [10].

Sin embargo el secado solar presenta un inconveniente: el carácter periódico de la radiación solar que repercute en el secado efectivo del producto, por lo cual se tiene que buscar una estrategia de diseño y control adecuada al secador solar. Una alternativa para solucionar este inconveniente es el uso de una fuente de energía auxiliar que vaya de acuerdo a las condiciones ambientales y geográficas del lugar donde se instalara el sistema, ya que para la correcta aplicación de un sistema de secado solar implica un estudio adecuado a las características del producto y la zona geográfica donde se instalara el sistema.

En este capítulo se presenta los fundamentos del secado solar y los fundamentos de los aerogeneradores, en el primero se describe: el proceso y períodos de secado, tecnología de secado solar y colectores solares, en el segundo se presenta: la descripción general y funcionamiento de un aerogenerador así como los tipos de aerogeneradores, estos temas se describen con la finalidad de conocer y entender los principios fundamentales por los cuales se rige el funcionamiento del sistema híbrido termosolar eólico.

2.2. Fundamentos de secado solar.

2.2.1. Proceso de secado.

Secar significa extraer la humedad o hacer que se evapore de un cuerpo mojado mediante corrientes de aire y calor aplicado, es un proceso en el que existe un intercambio de calor y masa. Implica la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada [11].

Una de las maneras más simples para lograr el secado (de alimentos o cualquier otro material) es exponer el material húmedo a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad.

A continuación se explican consideraciones importantes para el proceso de secado.

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} , es la relación de la masa de agua del producto con la masa total del producto húmedo y la humedad con base seca, H_{bs} , es la relación de la masa de agua del producto con la masa de la materia seca del producto y se definen con las ecuaciones 2.1 y 2.2.

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

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

Donde;

m_a = masa de agua del producto

m_s = masa de la materia seca del producto

m_t = masa total del producto húmedo

Capítulo 2. Fundamentos.

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 [7].

2.2.1.2. Humedad de 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 [12].

2.2.1.3. 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:

$$m_{agua} = m_s \Delta H_{bs} = m_a \Delta X \quad (2.3)$$

Donde;

m_{agua} = cantidad de agua eliminada del producto

ΔH_{bs} = humedad perdida por el producto en base seca

ΔX = humedad ganada por cada kg de aire seco

2.2.1.4. Balance de energía.

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

Capítulo 2. Fundamentos.

- No existe 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 porta 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:

$$m_a (h_2^* - h_1^*) \approx m_s \Delta H_{bs} c_{agua} (T_h) T_h \quad (2.4)$$

Donde $(h_2^* - h_1^*)$ 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, 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.

$$R_T = \frac{m_t L_v (T_h)}{m_a h_1^*} \quad (2.5)$$

Donde L_v es el calor latente de vaporización del agua (J/kg).

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 un 60 % [7].

2.2.1.5. Velocidad de secado.

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

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_a \Delta X = \dot{m}_s \Delta H_{bs} \quad (2.6)$$

Donde; \dot{m}_{agua} es el flujo másico de la cantidad de agua eliminada del producto, \dot{m}_a es el flujo másico del agua del producto, \dot{m}_s es el flujo másico de la materia seca del producto.

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

$$V = \frac{\dot{m}_{agua}}{\dot{m}_s} = \frac{\Delta H_{bs}}{t} \quad \text{Kg agua/ (seg Kg sólido seco)} \quad (2.7)$$

$$V_A = \frac{\dot{m}_{agua}}{A} = \dot{m}_s \frac{\Delta H_{bs}}{A} \quad \text{Kg agua/ (seg m}^2\text{)} \quad (2.8)$$

La velocidad de secado está 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 ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), es posible calcular la velocidad de secado suponiendo que el producto permanece a temperatura constante T_h , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = hA\Delta T = \dot{m}_{\text{agua}}L_v(T_h) \quad (2.9)$$

Donde; \dot{Q} es el calor transferido por convección entre el aire y el producto por unidad de tiempo, Q es el calor transferido por convección entre el aire y el producto, t es el tiempo de transferencia del calor y ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire que entra y el producto a secar.

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

$$V_A = \frac{h\Delta T}{L_v}(T_h) \quad (2.10)$$

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso, 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 [7].

2.2.1.6. Tiempo de secado.

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

$$t_c = \frac{m_s(H_0 - H_C)}{\dot{m}_{\text{agua}}} = \frac{(H_0 - H_C)}{V_c} \quad (2.11)$$

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

$$t_d = \frac{H_c}{V_c} \ln \frac{H_c}{H_1} \quad (2.12)$$

Donde, H_c es la humedad crítica, H_0 y H_1 son humedades en un instante del tiempo de secado y en ambos casos, están expresadas en base seca.

2.2.2. Períodos de secado.

Para diseñar un secador o un sistema de secado, es esencial tener información cuantitativa sobre la velocidad a la cual el agua es removida del material húmedo. Un conjunto de pruebas debidamente planeadas pueden ser usadas para simular la mayoría de las formas de secado en escala industrial.

La figura 2.1a muestra un gráfico de contenido de humedad (w) contra el tiempo (θ) obtenida experimentalmente del secado de un sólido. Esta curva representa un caso típico cuando un sólido pierde humedad inicialmente por la evaporación de una superficie saturada en un sólido, seguido de un período de evaporación de una superficie saturada en un sólido, seguido de un período de evaporación de una superficie saturada el área disminuye gradualmente y, finalmente es evaporada en el interior del sólido.

Figura 2.1b indica que la velocidad de secado está sujeta a la variación con el tiempo o el contenido de humedad, ilustrado gráficamente o numéricamente la diferenciación de la curva y el trazo de $dw / d\theta$ frente W , como se muestra en la figura 2.1b, o como $dw / d\theta$ frente θ , como se muestra en la figura 2.1c. Estas curvas ilustran que el proceso de secado no es fluido. Figura 2.1c tiene la ventaja de mostrar la duración de cada período de secado.

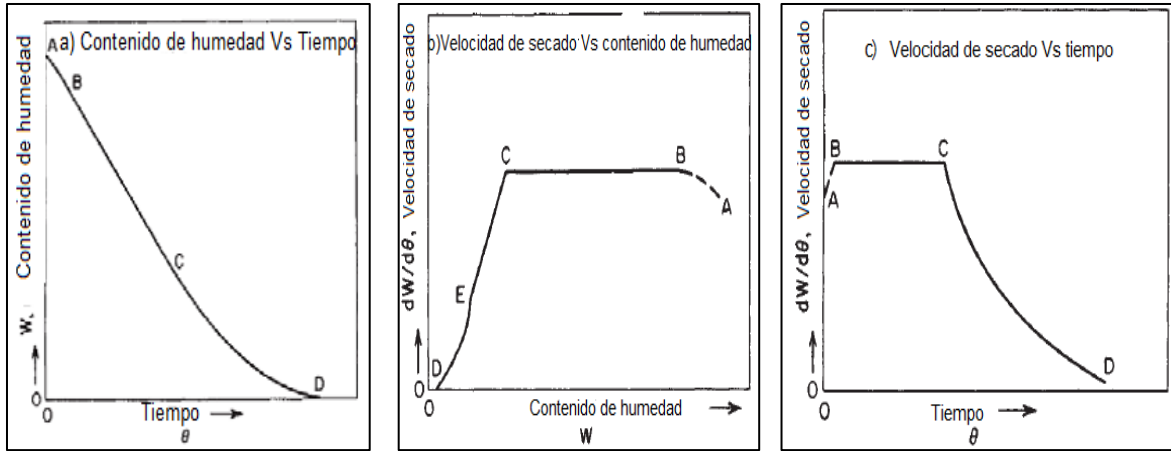


Figura 2.1. Curvas de período de secado [13].

2.2.2.1. Período de velocidad constante.

En el período de velocidad constante el movimiento de humedad dentro del sólido es suficiente para mantener una condición saturada en la superficie, y la velocidad de secado se controla por la velocidad de calor transferido a la superficie de evaporación.

El proceso de secado por difusión de vapor desde la superficie saturada del material a través de una película de aire estancado en el medio ambiente y como la tasa de transferencia de masa equilibra la transferencia de calor, la temperatura de la superficie saturada permanece constante. Si el calor para el secado es suministrado exclusivamente por convección, la temperatura de la superficie se aproxima a la temperatura del punto de ebullición en lugar de la temperatura de bulbo húmedo. Este modo de transferencia de calor ocurre típicamente en los secadores indirectos.

La radiación es un modo eficaz de transferencia de calor a medida que aumenta la velocidad constante mediante el aumento de la transferencia de calor por convección y el aumento de la temperatura de la superficie por encima de la temperatura de bulbo húmedo [13].

La magnitud de la velocidad constante depende de tres factores:

- El calor o el coeficiente de transferencia de masa
- El área expuesta al medio de secado

- La diferencia en la temperatura o la humedad entre la corriente de gas y la superficie mojada del sólido.

2.2.2.2. Período de velocidad decreciente.

El período de velocidad decreciente comienza en el contenido de humedad crítico cuando el período de velocidad constante termina. Esto generalmente se divide en dos zonas a saber, (a) la zona de secado de la superficie insaturado y (b) la zona de los controles de movimiento de la humedad interna. En la primera zona, toda la superficie de evaporación ya no se puede mantener y se saturó por movimiento de la humedad dentro del sólido. La velocidad de secado disminuye desde la parte insaturada, y por lo tanto la velocidad de la superficie total disminuye. Generalmente, la velocidad de secado depende de factores que afectan a la difusión de la humedad de la superficie de evaporación y los que afectan a la velocidad de movimiento de la humedad interna. Como avanza el secado, se alcanza el punto en el que es insaturada la superficie de evaporación. El punto de evaporación se mueve en el sólido, y el proceso de secado entra en el segundo período de velocidad decreciente. La velocidad de secado se rige por la velocidad de movimiento de la humedad interna; la influencia de las variables externas disminuye [13].

2.2.3. Tecnología de secado solar.

Un secador solar es un equipo que transforma la energía radiante del sol, a través de uno de sus componentes, en energía térmica, capaz de proporcionar la energía necesaria para elevar la temperatura del producto y evaporar la humedad contenida en este.

Los dos elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que circula en ella, estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a equipos de secado solar [14].

El aire circula dentro de la cámara de secado para entregar el calor absorbido en el colector y remover la humedad que se evapora de los alimentos.

Capítulo 2. Fundamentos.

La circulación de aire se logra por dos métodos:

Circulación por convección natural: No se requiere energía externa, el aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se complica cuando el tamaño del equipo aumenta pues las corrientes convectivas no tendrán la fuerza suficiente para mover grandes cantidades de aire a través de las bandejas con el alimento. Por esto es mejor aplicarla en equipos pequeños o medianos en los que se pueden lograr velocidades de aire de 0,4 a 1 m/s al interior de la cámara. En los equipos grandes la velocidad no sobrepasa los 0,1 a 0,3 m/s.

Circulación forzada: El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Con este tipo de circulación, además de facilitar el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño, se puede tener un mejor control del proceso de secado, pues podemos controlar la velocidad (entre 0,5 a 1 m/s) y flujo de aire caliente. La circulación forzada permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo sin presentar problemas de circulación de aire.

La principal desventaja de la circulación forzada es la necesidad de una fuente de energía eléctrica, aunque puede hacerse uso de la energía fotovoltaica [15].

2.2.3.1. Clasificación de secadores solares.

Los sistemas de secado solar se pueden clasificar según los componentes y el modo de utilización de la energía solar. A groso modo se pueden definir dos grandes tipos, los secadores solares activos y los pasivos.

Los primeros, caracterizados por la circulación forzada del aire a través del producto procesado, los segundos emplean la circulación natural del aire. En cada uno de los grupos se distinguen 3 diseños de diferentes formas: los secadores solares directos también llamados integrales, los indirectos, o nombrados como distribuidos, y los mixtos, que resultan de la hibridación de los anteriores [14].

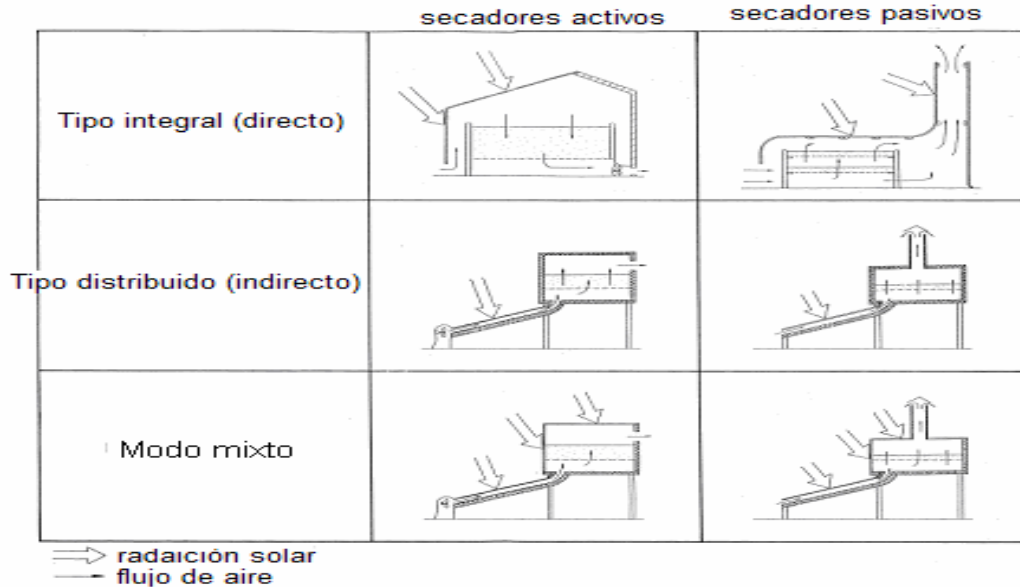


Figura 2.2. Clasificación de secadores solares [16].

2.2.3.1.1. Sistemas de secado solar pasivos.

Los secadores solares pasivos con circulación de vida a la convección natural aparecen como los más atractivos para su aplicación en áreas rurales remotas. Estos sistemas han resultado de la evolución de los secadores a cielo abierto mejorando las prestaciones en diversos aspectos: requieren menor superficie para secar cantidades de productos similares, mejoran la calidad del secado, acortan el período y con todo, aun son relativamente económicos en inversión inicial y mantenimiento [17].

2.2.3.1.1.1. Secadores solares pasivos directos.

El producto a secar se sitúa en una cámara de secado con las paredes transparentes de forma que la radiación solar incide directamente sobre el producto, actuando como superficie de captación. La energía térmica extrae humedad del grano a la vez que al calentar el aire reduce su humedad relativa. Por otra parte la expansión del aire de la cámara de secado provoca su circulación y la remoción del vapor de la cámara transportando en el aire caliente.

La desventaja más destacable de estos diseños es el riesgo de dañar los productos por sobrecalentamiento y las tasas de secado relativamente lentas debido a una pobre

extracción del vapor. Para superar estas dificultades es interesante el empleo de chimeneas solares.

Dentro de los secadores pasivos directos se distinguen diversos diseños: los secadores de armario y los de invernadero, los primeros se caracterizan por ser unidades pequeñas, prácticamente de uso doméstico. La configuración habitual consiste en una caja acristalada bien aislada con agujeros de ventilación en la base y la parte superior de las paredes.

El otro tipo de secadores directos pasivos son los invernaderos modificados. Se caracterizan por grandes superficies transparentes que normalmente incorporan paneles aislantes para evitar el enfriamiento nocturno y algún sistema de almacenamiento. Los secadores invernaderos bien diseñados permiten mayor control de las condiciones del proceso de secado que los secadores armario y a la vez son más adecuados para su aplicación a gran escala [17].

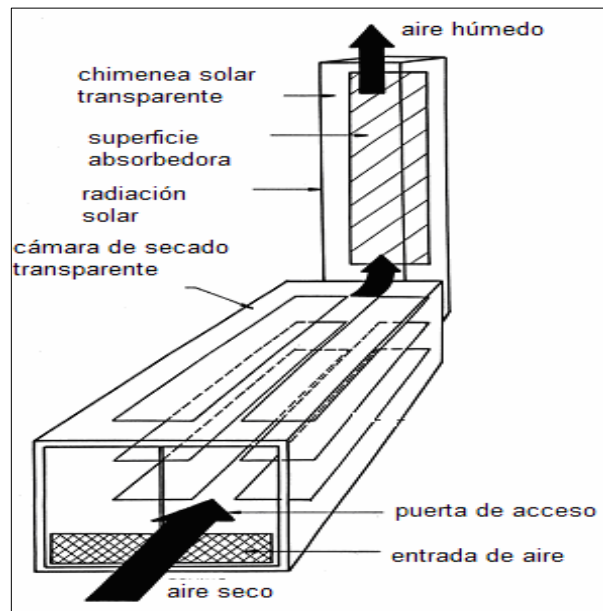


Figura 2.3. Características de un típico secador solar pasivo directo [7].

2.2.3.1.1.1.1. Secador solar pasivo tipo gabinete.

Los secadores de gabinete solares pasivos son generalmente unidades simples y de bajo costo que tienen altas aplicaciones para fines domésticos. Son adecuados para el secado de productos agrícolas, especias y hierbas, etc., construidos normalmente con un área de secado de 1-2 m² y capacidad de 10 a 20 kg.

La figura 2.4. Presenta un secador solar tipo gabinete y sus principales características. 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.

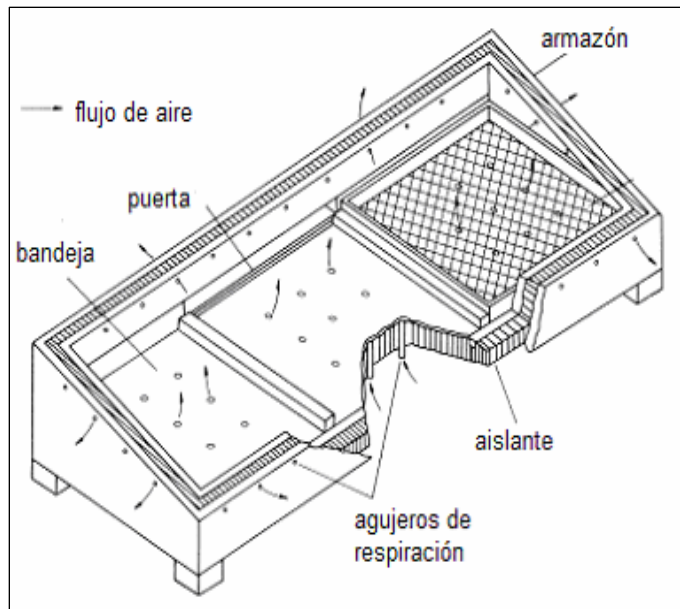


Figura 2.4. Secador solar pasivo tipo gabinete [13].

2.2.3.1.1.1.2. Secador solar pasivo tipo invernadero.

Este tipo de secador solar está 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 Sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios. **21**

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 [13].

2.2.3.1.1.2. Secadores solares pasivos indirectos.

En los secadores tipo indirecto el producto es situado en una cámara opaca y es calentado por aire que circula a través de ella. El aire, a su vez, ha captado energía térmica en colectores solares de termosifón donde las pérdidas de carga son muy pequeñas. Estos dispositivos son especialmente recomendados para productos perecederos y frutas que sufren una notable disminución en contenido vitamínico si son expuestas directamente al sol. Los secadores indirectos pueden alcanzar temperaturas de operación más elevadas que los directos, y con ellos conseguir productos deshidratados de mayor calidad.

En referencia a las desventajas hay que tener en cuenta la fluctuación de la temperatura y la dificultad para tener unas condiciones constantes en la cámara de secado. En comparación con los sistemas directos requieren inversiones iniciales mayores y también los costos de operación y mantenimiento son superiores [17].

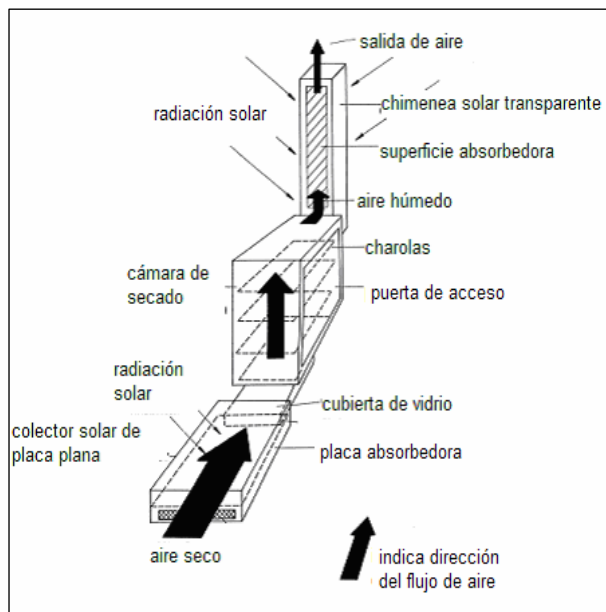


Figura 2.5. Características de un típico secador solar pasivo indirecto [7].

2.2.3.1.1.3. Secadores solares pasivos mixtos.

En los secadores mixtos se combina la acción directa de la radiación solar con un precalentamiento de aire. El diseño básico tiene los mismos elementos que un secador indirecto pero algunas superficies transparentes [17].

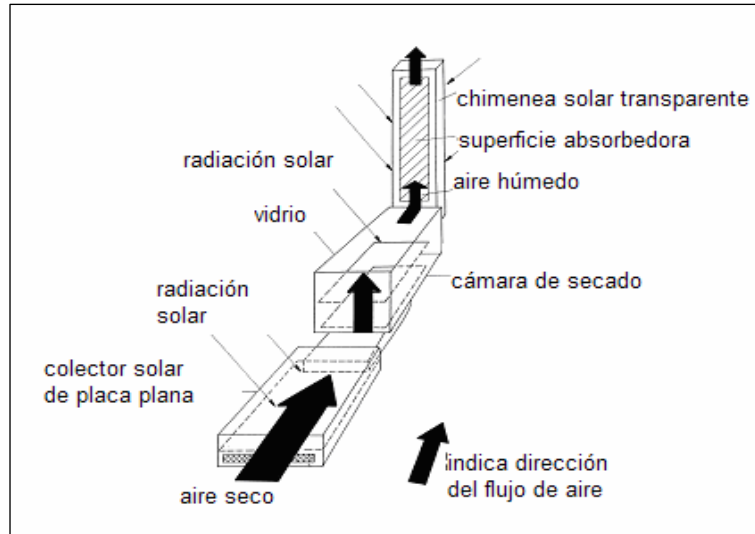


Figura 2.6. Características de un típico secador solar pasivo tipo mixto [7].

2.2.3.1.2. Sistemas de secado solar activos.

Los secadores solares activos son de circulación forzada. Un secador solar activo típico depende únicamente del sol como fuente térmica pero emplea ventiladores y bombas eléctricas para forzar el flujo de aire, además trabajan con altas temperaturas de secado que requieren importantes caudales de aire [17].

2.2.3.1.2.1. Secadores solares activos directos.

Dentro de estos secadores tipo invernadero se puede hablar de tres diferentes diseños característicos. Un primer grupo lo forman los diseños en los que no existen superficies especializadas en la captación y es el mismo producto el que actúa como colector. El segundo grupo es el de los invernaderos en los que la adsorción se realiza en elementos que pueden almacenar la energía térmica.

Capítulo 2. Fundamentos.

El tercer grupo consiste básicamente en un exterior del invernadero transparente que actúa como cristal del colector y una cámara interior que se dispone para ser la superficie captadora [17].

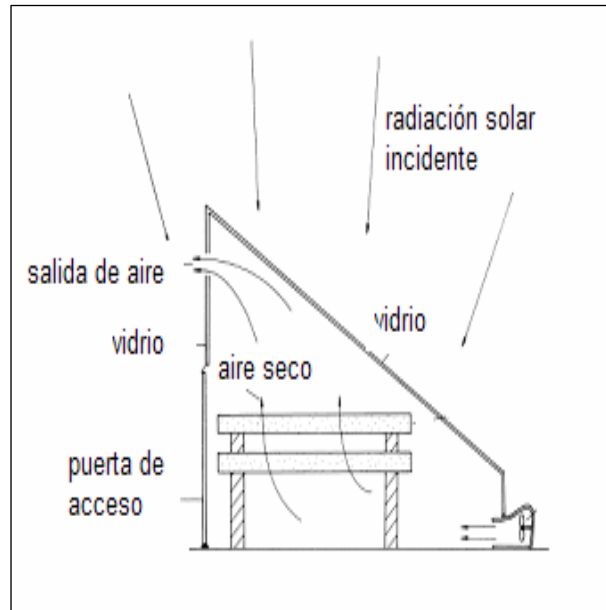


Figura 2.7. Secador solar activo directo tipo invernadero [7].

2.2.3.1.2.2. Secadores solares activos indirectos.

Para los sistemas de secado convencionales la eficiencia de secado aumenta con la temperatura. Esto no ocurre para los secadores solares debido a la pérdida de eficiencia de los colectores al incrementar la temperatura de trabajo. Por lo tanto, la temperatura de trabajo es una decisión crítica en estos diseños. Las altas temperaturas implican caudales pequeños y ahorro en los ventiladores pero requieren de muy buenos aislamientos en las tuberías, mientras que empleando bajas temperaturas se minimizan los costos en el aislamiento y las pérdidas de energía [16].

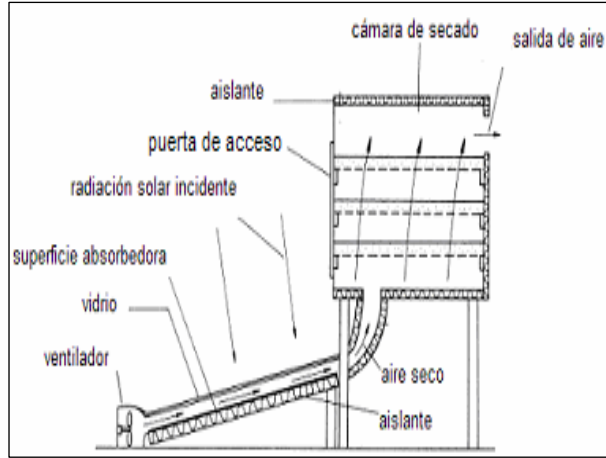


Figura 2.8. Características de un típico secador solar activo tipo indirecto [7].

2.3.3.1.2.3. Secadores solares activos mixtos.

Los secadores solares tipo mixtos, combinan elementos de los secadores tipo directo e indirecto, comprende los siguientes componentes: a) un calentador solar de aire, b) conductos de aire, c) una cámara de secado separada y d) un 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. son pocos comunes entre los secadores solares activos [11].

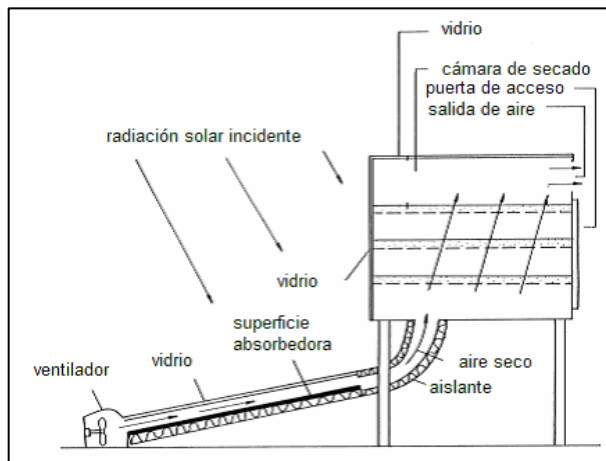


Figura 2.9. Características de un secador solar activo tipo mixto [7].

2.2.3.2. Forma de operación.

La forma de operar un secador da lugar a dos alternativas: en tandas o continuo.

El Secado en tandas consiste en cargar el secador con el producto y no retirarlo hasta que haya terminado el proceso de secado. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina. Esta manera de operación permite un diseño más sencillo de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta apropiado en secadores pequeños y medianos.

En Secado continuo: El producto se va cargando y descargando en tandas parciales. Dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. El período entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño, puede existir una carga y descarga parcial una vez por día o varias veces en el mismo día [15].

2.3. Colectores solares

Los colectores solares son dispositivos utilizados para coleccionar, absorber y transferir energía solar a un fluido, que puede ser agua o aire. La energía solar, puede ser utilizada para calentar agua, para sistemas de calefacción o para climatización de piscinas.

2.3.1. Colectores de placa plana con cubierta

Los colectores de placa plana son los más usados para calentar agua en los hogares y para los sistemas de calefacción. Un colector de placa plana se compone básicamente de una caja metálica con aislamiento con una cubierta de vidrio o de plástico (la ventana) y de una placa absorbidora de color oscuro. La radiación solar es absorbida por la placa que está construida de un material que transfiere rápidamente el calor a un fluido que circula a través de tubos en el colector.

Este tipo de colectores, calientan el fluido que circula a una temperatura considerablemente inferior a la del punto de ebullición del agua y son los más

Capítulo 2. Fundamentos.

adecuados para aplicaciones donde la demanda de temperatura es de 30-70 °C. Son los más utilizados para calentar agua en sistemas domésticos y comerciales y en piscinas cubiertas.

Un colector de placa plana consiste en un absorbedor, una cubierta transparente, un marco, y aislación. La cubierta transparente transmite una gran cantidad de la luz de onda corta del espectro solar y al mismo tiempo, sólo deja pasar muy poca radiación de onda larga (calor emitido por el absorbedor) produciendo un efecto invernadero.

Además, la cubierta transparente evita que el viento y las brisas se lleven el calor colectado (convección). Junto con el marco, la cubierta protege el absorbedor de las condiciones meteorológicas adversas. Típicamente el marco está fabricado de materiales de aluminio y de acero galvanizado, también se utiliza plástico reforzado con fibra de vidrio.

La aislación en la parte posterior del absorbedor y en las paredes laterales reduce las pérdidas de calor por conducción. Esta aislación es por lo general de la espuma de poliuretano, lana mineral, fibra de lana de vidrio, etc.

Estos colectores demostraron poseer una muy buena relación precio/calidad y tienen una amplia gama de posibilidades para su montaje (en el techo, como parte del techo, o solos).



Figura 2.10. Esquema de un colector de placa plana con cubierta [18].

2.3.2. Colectores de placa plana sin cubierta

Este tipo de colectores, sencillos y baratos, consisten en un absorbedor pero carecen de la cubierta transparente. No incluyen ningún aislamiento adicional, de manera que la ganancia de temperatura queda limitada a unos 20 °C sobre la del aire del ambiente, son los más adecuados para aplicaciones de baja temperatura. Actualmente, son utilizados para la calefacción de piscinas al aire libre, pero existen otros mercados, incluidos los de calefacción de temporada en las piscinas cubiertas, calefacción de agua para lavar coches, y calefacción del agua utilizada en piscicultura. También existe un mercado potencial de estos colectores para calentamiento de agua en lugares remotos, como campamentos de verano.

Los absorbedores de estos colectores son generalmente de plástico negro tratado para resistir la luz ultravioleta, o están contruidos por tubos de metal o plástico recubierto de pigmentos ennegrecidos por los que circula el agua .Dado que estos colectores no tienen cubierta, una gran parte de la energía solar absorbida se pierde principalmente por convección [18].

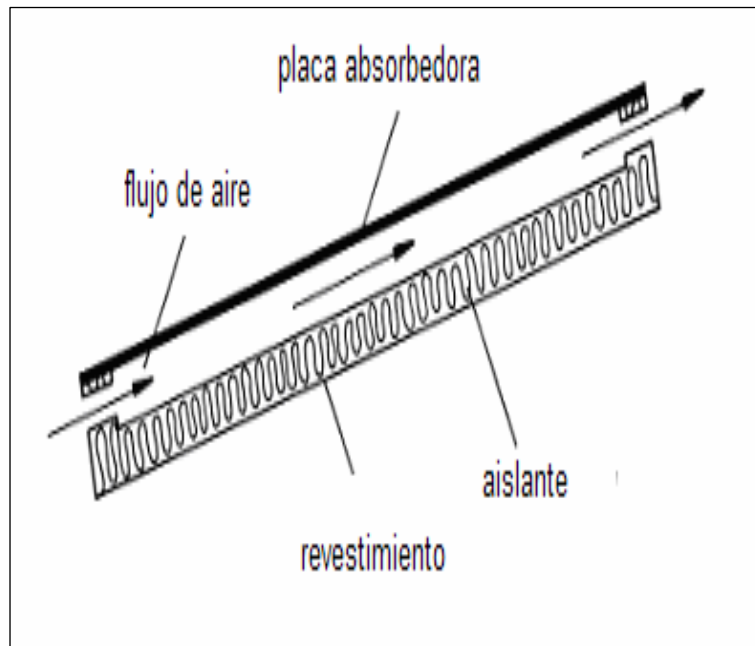


Figura 2.11. Esquema de un colector de placa plana sin cubierta [7].

2.3.3. Colectores concentradores parabólicos

Su funcionamiento e instalación es exactamente la misma que los colectores de placa plana convencionales. Estos colectores poseen un sistema de concentración de radiación solar tipo Concentradores Parabólicos Compuestos, para obtener temperaturas más elevadas y un mayor rendimiento. Estas características se deben a que el área de pérdidas es menor al área de colección logrando una minimización de las pérdidas y alcanzando un rendimiento cercano al 50 %.

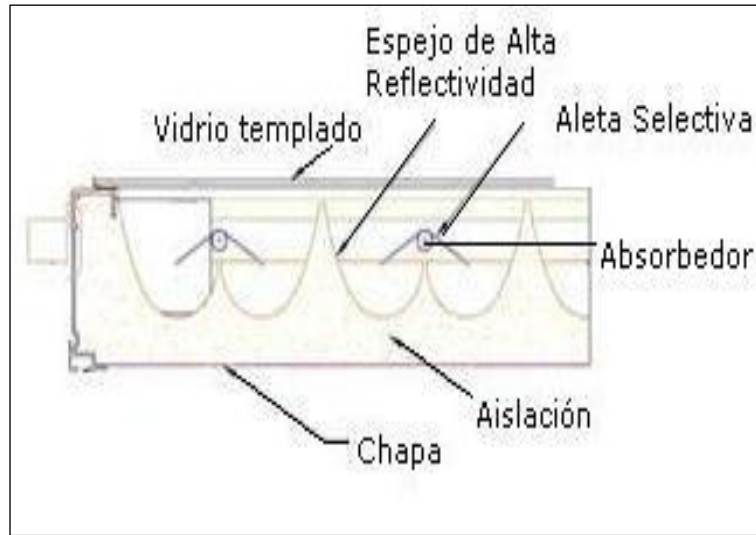


Figura 2.12. Esquema de un colector concentrado parabólico [18].

2.3.4. Colectores de tubos de vacío

Estos colectores se componen de un conjunto de tubos de vacío (o evacuados) cada uno de los cuales contienen un absorbedor (generalmente una plancha de metal con tratamiento selectivo o de color negro), el cual recoge la energía solar y la transfiere a un fluido portador (calo-portador). Gracias a las propiedades aislantes del vacío, las pérdidas de calor son reducidas y pueden alcanzarse temperaturas en el rango de 77 °C a 177 °C. De esta manera, este tipo de colectores resultan particularmente apropiados para aplicaciones de alta temperatura.

Capítulo 2. Fundamentos.

Por su forma cilíndrica, aprovechan la radiación de manera más efectiva que los colectores planos, al permitir que los rayos de sol incidan de forma perpendicular sobre los tubos durante la mayor parte del día. Estos colectores son hasta unos 30 % más eficientes que los colectores planos, pero son bastante caros, por unidad de superficie suelen costar aproximadamente el doble que un colector de placa plana.

Existen dos tipos de colectores tubulares de vacío, según sea el método empleado para el intercambio de calor entre la placa y el fluido caloportador: Los de flujo directo y con de tubo de calor (heat pipe).

2.3.4.1. Colectores de flujo directo.

Estos consisten en un grupo de tubos de vidrio dentro de cada uno de los cuales hay una aleta de aluminio absorbedor, conectada a un tubo de metal (normalmente cobre) o tubo de vidrio. La aleta posee un recubrimiento selectivo que absorbe la radiación solar, e inhibe la pérdida de calor radiactivo. El fluido de transferencia de calor es el agua y se distribuye a través de las tuberías, una para la entrada del líquido y el otro para la salida de fluidos. Los colectores de tubos de vacío de corriente directa vienen en varias variedades de acuerdo al tipo de tubería utilizada.

1. Fluido concéntrico de entrada y salida (vidrio-metal). Estos utilizan un único tubo de vidrio. Dentro de este está la tubería de cobre adosada a la aleta. Este tipo de construcción permite que cada una de las tuberías roten para otorgar el ángulo de inclinación deseado y permitir la máxima absorción en la aleta, aun cuando el colector se monta horizontalmente. El diseño de vidrio y metal es eficiente, pero pueden tener problemas, las diferentes tasas de expansión térmica del vidrio y los tubos de metal pueden hacer que la junta entre ellos se debilite y provocar una pérdida de vacío. Sin el vacío, la eficiencia de estos colectores no es mejor, y puede ser peor que la de un colector de placa plana.

2. Tuberías de entrada y salida separadas (vidrio-metal). Este es el tipo tradicional de colectores de tubos de vacío. El absorbedor puede ser plano o curvo. Como en el caso del diseño de tubos concéntricos, la eficiencia puede ser muy elevada, sobre todo

cuando se requieren temperaturas de trabajo relativamente bajas. La posible pérdida de vacío después de algunos años de funcionamiento vuelve a ser el inconveniente.

3. Dos tubos de vidrio fundido juntos en un extremo (vidrio-vidrio). El tubo interior está revestido con un absorbedor integrado cilíndrico de metal. En general no son tan eficientes como los tubos de vidrio-metal, pero son más baratos y tienden a ser más confiables. Para aplicaciones de muy alta temperatura, los tubos de vidrio-vidrio pueden ser más eficientes que sus homólogos de vidrio y el metal [18].

2.3.4.2. Colectores con tubo de calor (heat pipe).

En este sistema los tubos de vacío llevan un fluido vaporizante que no puede salir del interior del tubo y que funciona como caloportador. Este fluido se evapora por efecto de la radiación solar, asciende hasta el extremo superior del tubo que se encuentra a temperatura inferior, esto hace que el vapor se condense, ceda su energía y retorne a su estado líquido cayendo por acción de la gravedad a la parte inferior del tubo, donde al recibir más radiación, vuelve a evaporarse y comienza un nuevo ciclo.

Los tubos de calor son considerados como los “superconductores” del calor, debido a su muy baja capacidad calorífica y a su excepcional conductividad (miles de veces superior a la del mejor conductor sólido del mismo tamaño). El uso del tubo de calor está muy extendido en la industria y, basándose en este principio de funcionamiento se fabrican los actuales colectores de vacío con tubo de calor.

Una ventaja del sistema de tubos de calor sobre el de flujo directo es la conexión "seca" entre el absorbedor y la cabecera, lo que hace más fácil la instalación y también significa que los tubos se pueden cambiar sin vaciar el fluido de todo el sistema (figura 9 b). Un inconveniente de estos colectores con tubos de calor es que deben ser montados con un ángulo mínimo de inclinación de alrededor de 25 ° con el fin de permitir que el fluido interno de la tubería de calor retorne a la zona de absorción de calor, en cambio los de flujo directo pueden ser instalados de manera horizontal [18].

2.4. Fundamentos de aerogeneradores

2.4.1. Descripción general de un aerogenerador y principio de funcionamiento

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica), a través del cual se produce energía eléctrica.

La energía eólica, que es en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

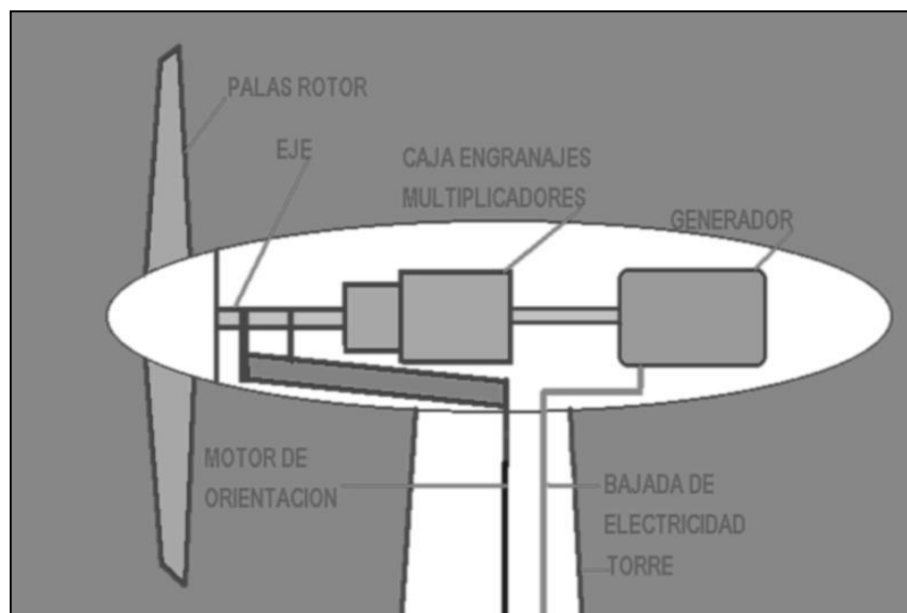


Figura 2.13. Principio de funcionamiento de un aerogenerador [19].

2.4.2. Tipos de aerogeneradores

Los aerogeneradores se clasifican dependiendo del eje de rotación

2.4.2.1 .Aerogeneradores de eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje horizontal también son conocidos como HAWT por sus siglas en inglés (Horizontal Axis Wind Turbine). Este tipo de aerogeneradores es el más común entre los aerogeneradores de gran escala por las ventajas a continuación presentadas sin embargo también se discuten sus desventajas.

Ventajas

- Pueden transformar la energía cinética del viento en un 70 %.
- Pueden ser construidos a mayores escalas.
- Pueden utilizar al máximo la fuerza de arrastre variando la aerodinámica de la pala.

Desventajas

- Requieren flujos de viento constante para un buen desempeño.
- Presenta problemas por las fuerzas giroscópicas en el rotor para cambiar su orientación del viento.

2.4.2.2. Aerogeneradores de eje vertical.

Son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine).

Ventajas:

- No necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil.
- No necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento.

Desventajas:

- Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja.

Capítulo 2. Fundamentos.

- Baja eficiencia.
- No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor.
- Requieren cables tensores.

Los aerogeneradores también se pueden clasificar por su tamaño de producción encontrándose:

Aerogeneradores de pequeña escala: Hasta 10 kW y a su vez lo podemos dividir en 3 subgrupos dependiendo del tamaño del diámetro del rotor.

- Micro Aerogeneradores: Son los más pequeños de todos, tendiendo un diámetro hasta de 1.25 m.
- Mini Aerogeneradores: Con un diámetro de hasta 3m.
- Aerogeneradores tamaño casero: Con un diámetro de hasta 10m.

Aerogeneradores de Mediana escala: Aquellos que generan de 10 kW hasta 500 kW. Llegan a tener un diámetro de hasta 50 metros.

Aerogeneradores de gran escala: Generan de 1.5 a 3 MW, llegan a tener un diámetro hasta del tamaño de una cancha de fútbol (Poco más de 100 m) [20].

2.5. Conclusión.

En este capítulo se describieron los principales fundamentos teóricos necesarios para conocer y entender el funcionamiento y estructura del sistema híbrido termosolar eólico para la conservación de productos agropecuarios, por lo cual se describieron los principios que rigen el proceso y períodos de secado así mismo se presentó la clasificación de secadores solares los cuales se pueden clasificar según los componentes y el modo de utilización de la energía solar definiéndolos a groso modo en dos tipos; secadores solares pasivos y secadores solares activos.

De igual manera se realizó la descripción y clasificación de los colectores solares, los cuales se clasifican en tres tipos; colectores de placa plana, colectores concentradores parabólicos y colectores de tubo de vacío siendo estos últimos los que alcanzan altas temperaturas en un rango de 77 °C a 177 °C apropiados para aplicaciones de alta temperatura.

También se hizo la descripción de los componentes de un aerogenerador, así como de su funcionamiento y clasificación la cual se divide en dos tipos dependiendo del eje de rotación; aerogeneradores de eje horizontal los más comunes en aplicaciones de gran escala y aerogeneradores de eje vertical.

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

3.1. Introducción.

En este capítulo se establece los métodos y técnicas para realizar el diseño y la construcción del sistema híbrido termosolar- eólico para la conservación de productos agropecuarios. En esta etapa es de suma importancia considerar la problemática a la cual se le quiere dar solución, en este caso particular la problemática es la falta de energía solar por las noches o días nublados que provoca la disminución del rendimiento del sistema durante algunos períodos, de igual manera es importante tener presente como se dará solución a esta problemática, en este caso se propone implementar el uso de una fuente de energía auxiliar (aerogenerador) que ayude a mantener condiciones controlables de trabajo en el sistema.

De acuerdo a lo anterior se establece los procedimientos para realizar cada una de las actividades involucradas a fin de llegar a un diseño óptimo del sistema. Una vez obtenido el diseño del sistema se procede a implementarlo dando paso a la construcción tomando en cuenta cada una de las características generales de diseño para hacer la selección de los materiales y equipos, así como la distribución de estos.

Este apartado comprende y describe desde la metodología establecida para el desarrollo del sistema, como también las actividades para llegar a un diseño adecuado a los requerimientos que se establecieron, así como los materiales y equipos empleados para la construcción y la descripción de las componentes del sistema, y por ultimo una descripción del sistema de medición y control.

3.2. Metodología para el desarrollo del sistema.

El desarrollo del sistema híbrido se realizó bajo la siguiente metodología (fig.3.1), la cual se divide en 3 etapas: diseñar, construir y evaluar, nos permitió lograr paso a paso cada uno de los objetivos particulares y de esta manera cumplir con el objetivo principal de este trabajo.

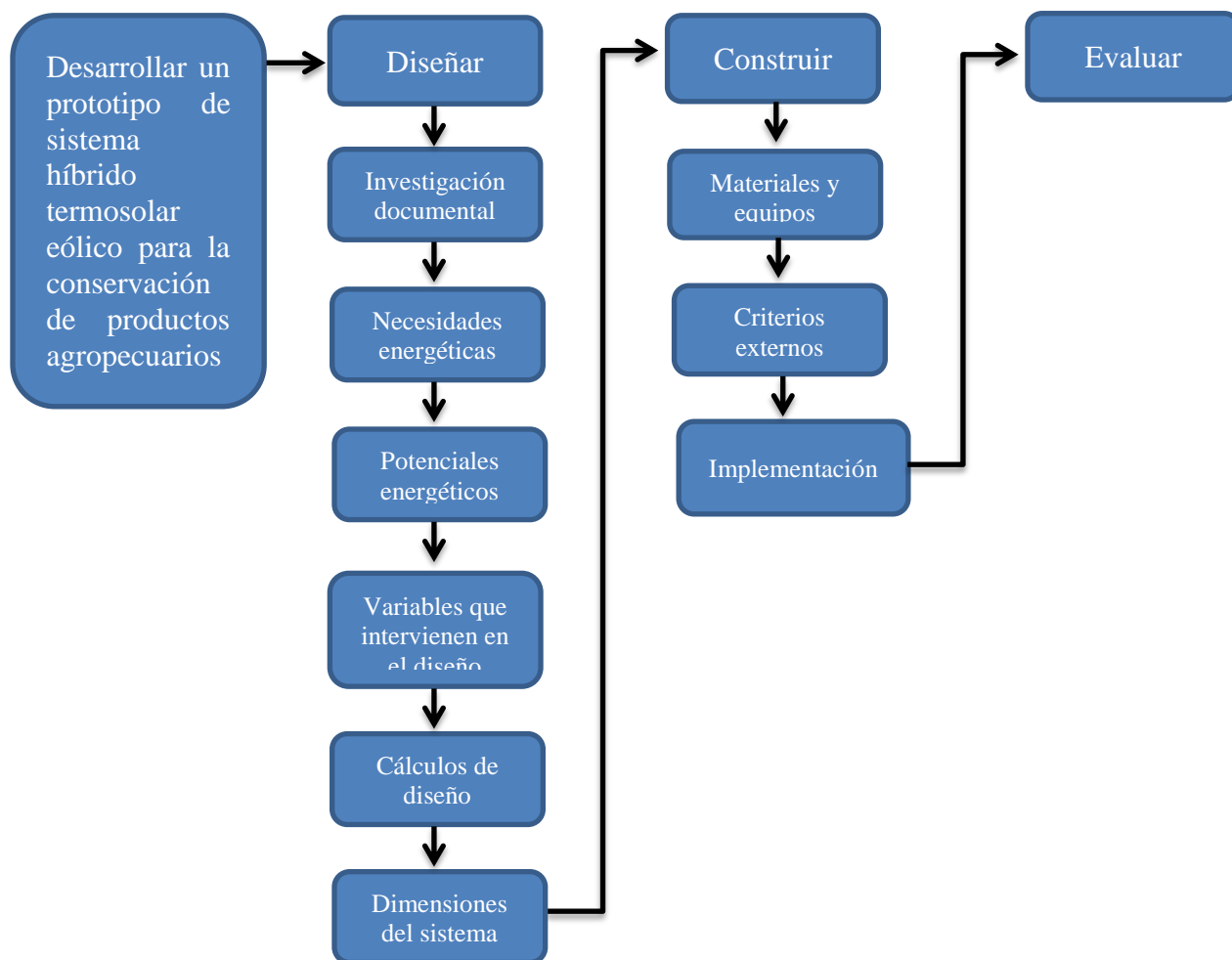


Figura 3.1. Metodología utilizada para el desarrollo del sistema híbrido termosolar eólico para conservación de productos agropecuarios.

A continuación se describen las actividades involucradas en cada etapa:

Diseño del prototipo:

- Investigación documental: Se realiza una Investigación documental acerca del tema.
- Necesidades energéticas: Se realiza un diagnóstico de las necesidades energéticas para el diseño del sistema, determinando los grupos de productos que se procesaran en él.
- Potencial energético: Se consideran los potenciales energéticos solar y eólico disponibles de la zona donde se instala el sistema en este caso la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Variables que intervienen en el diseño: Se establecen las variables físicas que intervienen en el diseño como lo son: el tipo y cantidad de producto, humedad inicial y final del producto, temperatura crítica del producto.
- Cálculos de diseño: Se calcula la cantidad de energía necesaria para el proceso de secado, el flujo de aire y la superficie de captación para cada grupo de producto.
- Dimensiones del sistema: Se establece las dimensiones del sistema de acuerdo a los cálculos de diseño.

Construcción del prototipo:

- Materiales y equipos: Se selecciona los materiales y equipos utilizados para la construcción del sistema considerando las variables calculadas en el diseño.
- Criterios externos: Se Consideran ciertos parámetros externos como: La latitud del lugar donde instala el sistema, orientación, temperatura ambiente, humedad relativa ambiente y radiación solar.
- Implementación: Se consideran todos los puntos anteriores dando paso a la implementación.

Evaluación del prototipo:

Se evalúa el sistema con carga y sin carga, para determinar su eficiencia.

3.3. Diseño.

3.3.1 Consideraciones de diseño.

Para realizar el diseño del secador primero se tiene que determinar la demanda energética, es decir cuál es el producto que se procesara en él, es este caso como se realiza el diseño de un secador solar que permita controlar parámetros de secado utilizando energía solar y eólica, para procesar diferentes tipos de productos es necesario conocer ciertas características de estos productos involucradas en los cálculos de diseño como lo son: el tipo de producto a secar, la cantidad, el contenido de humedad inicial y final y la temperatura crítica del producto.

A continuación se consideran los productos a procesar en el secador y se establecen las características de cada uno de ellos, clasificándolos por grupo y determinando los requerimientos extremos de estas características necesarios para realizar los cálculos de las bases de diseño (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Características y requerimientos extremos de los productos a procesar en el secador solar.

Producto	Contenido de humedad (%)		Temperatura crítica (°C)
	Inicial	Final	
Frutas			
Plátano	70-80	7-15	70
Durazno	85	15-25	65
Mango	80-85	12-18	70
Manzana	80-85	20-24	70
Uva	75-80	15-20	70
Requerimientos extremos	85	7	70
Hojas			
Tabaco	70-85	11-25	70

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Verduras			
Papa	70-75	8-13	75
Chile	75-80	5-14	90
Tomate	75	35	75
Requerimientos extremos	80	5	90
Granos			
Café	45-65	9-12	45
Cacao	60-80	25-30	50
Maíz	20-35	8-15	60
Arroz	20-30	12-18	60
Trigo	15-20	13-14	50
Requerimientos extremos	80	8	60

Otro de los puntos más importantes y que no debe de faltar para poder realizar el diseño del sistema es el potencial energético disponible del lugar donde se instalara el sistema. En este caso particular se consideran los potenciales energéticos solar y eólico disponibles en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Potencial energético solar y eólico disponible en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Ciudad	Radiación solar (kWh/m ²)			Potencial eólico anual a 50 m de altura (W/m ²)	Velocidad del viento máximo media anual (m/s)
	Min.	Max.	Med.		
Tuxtla Gtz, Chiapas	3.7	5.4	4.7	300-400	9.5

Fuente: CONAGUA. Normales climatológicas 1981-2000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Comisión Nacional del Agua.

A continuación se presentan algunas condiciones de ciertos parámetros externos útiles para la realización de los cálculos de las bases de diseño (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Condiciones de parámetros externos útiles para la realización de los cálculos de las bases de diseño.

Parámetro	Condición
Ubicación	Tuxtla Gutierrez, Chiapas: Latitud N 16° 45'

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

	Longitud W 93° 08'
Temperatura ambiente del aire	30°C
Humedad relativa media del ambiente	65 %
Radiación solar incidente	$20\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día} = 7300\text{MJ}/\text{m}^2/\text{año} = 7.3\text{Gj}/\text{m}^2/\text{año}$

Fuente: CONAGUA. Normales climatológicas 1981-2000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Comisión Nacional del Agua.

3.3.2. Bases de diseño.

A partir de las variables anteriores se procede a calcular las bases para el diseño del sistema híbrido térmico solar-eólico para la conservación de productos agropecuarios. Debido a que se realiza el diseño para un secador solar híbrido en el cual se pueda procesar diferentes grupos de productos agropecuarios, se toman los requerimientos extremos de la humedad inicial, humedad final y temperatura crítica de cada grupo de producto para realizar los cálculos.

3.3.2.1. Cálculo de la energía necesaria para el secado del producto.

Frutas

Se propone procesar 32 kg de frutas, considerando los requerimientos extremos de este grupo de productos se toma una humedad inicial de 85 %, humedad final de 7 % y temperatura no mayor de 70 °C considerando la temperatura crítica del producto esto para no deteriorarlo.

Se calcula la cantidad de humedad a eliminar :

$$M_w = \frac{W_w[M_i - M_f]}{1 - M_f} \quad (3.1)$$

Dónde:

M_w = Cantidad de humedad a eliminar (kg)

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

W_w =Masa total de la cosecha inicial (kg)

M_i = Fracción inicial de humedad base húmeda (%)

M_f =Fracción final de humedad en base húmeda (%)

Sustituyendo los valores en la ecuación.

$$M_w = \frac{32 \text{ kg}[0.85 - 0.07]}{1 - 0.07} = 26.83 \text{ kg}$$

$$32 \text{ kg} - 26.83 \text{ kg} = 5.17 \text{ kg}$$

Los 5.17 kg es la cantidad de producto seco.

Apartir de los kg de agua a evaporar se puede calcular la cantidad de energía a suministrar, tomándose el valor recomendado de 4,185 kJ por kg agua evaporada [10], mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(M_w) \tag{3.2}$$

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(26.83 \text{ kg}) = 112283.55 \text{ kJ}$$

$$112.2855 \text{ MJ} = 31.19 \text{ kW/h}$$

Hojas

Se propone procesar 32 kg de hojas, considerando los requerimientos extremos de este grupo de productos se toma una humedad inicial de 85 %, humedad final de 11 % y temperatura no mayor de 70 °C considerando la temperatura crítica del producto esto para no deteriorarlo.

$$M_w = \frac{32 \text{ kg}[0.85 - 0.11]}{1 - 0.11} = 26.60 \text{ kg}$$

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

$$32 \text{ kg} - 26.60 \text{ kg} = 5.4 \text{ kg}$$

Los 5.4 kg es la cantidad de producto seco.

Apartir de los kg de agua a evaporar se calcula la cantidad de energía a suministrar.

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(M_w)$$

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(26.60 \text{ kg}) = 111321 \text{ kJ}$$

$$111.321 \text{ mJ} = 30.92 \text{ kW/h}$$

Verduras

Se propone procesar 32 kg de verduras, considerando los requerimientos extremos de este grupo de productos se toma una humedad inicial de 80 % ,humedad final de 5 % y temperatura no mayor de 90 °C considerando la temperatura crítica del producto esto para no deteriorarlo.

$$M_w = \frac{32 \text{ kg}[0.80 - 0.05]}{1 - 0.05} = 25.26 \text{ kg}$$

$$32 \text{ kg} - 25.26 \text{ kg} = 6.74 \text{ kg}$$

Los 6.74 kg es la cantidad de producto seco

Apartir de los kg de agua a evaporar se calcula la cantidad de energía a suministrar.

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(M_w)$$

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(25.26 \text{ kg}) = 105713.1 \text{ kJ}$$

$$105.7131 \text{ mJ} = 29.36 \text{ kW/h}$$

Granos

Se propone procesar 32 kg de granos, considerando los requerimientos extremos de este grupo de productos se toma una humedad inicial de 80 % ,humedad final de 8 % y temperatura no mayor de 60 °C considerando la temperatura crítica del producto esto para no deteriorarlo.

$$M_W = \frac{32 \text{ kg}[0.85 - 0.08]}{1 - 0.08} = 25.04 \text{ kg}$$

$$32 \text{ kg} - 25.04 \text{ kg} = 6.96 \text{ kg}$$

Los 6.96 kg es la cantidad de producto seco.

Apartir de los kg de agua a evaporar se calcula la cantidad de energía a suministrar.

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(M_W)$$

$$Q_s = (4,185 \text{ kJ/kg})(25.04 \text{ kg}) = 104792.4 \text{ kJ}$$

$$104.7924 \text{ MJ} = 29.109 \text{ kW/h}$$

3.3.2.2. Cálculo del flujo de aire.

Frutas

Ya calculada la cantidad de agua a evaporar y el consumo energético, se procede a determinar la cantidad de aire para transportar la cantidad de calor para mantener la temperatura de trabajo preestablecida.

Para fines de cálculo se considera 112283.55 kJ. Considerando la temperatura de operación de 70 °C y una temperatura ambiente de 30 °C, se tiene una ΔT de 40 °C.

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

$$V_A = \frac{Q_s}{C_p(T_0 - T_G)} \quad (3.3)$$

Donde:

V_A = Flujo volumétrico de aire en m^3/h .

Q_s = Calor a suministrar al secador kJ/h .

C_p = Capacidad calorífica volumétrica del aire igual a $1.283 \text{ kJ/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para un suministro energético de 112283.55 kJ/h , se obtiene un valor de v_A , aplicando la ecuación anterior.

$$V_A = \frac{112283.55 \text{ kJ/h}}{(1.283 \text{ kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C})(40 \text{ }^\circ\text{C})} = 2187.91 \text{ m}^3/\text{h}$$

Hojas

Para un suministro energético de 111321 kJ/h , temperatura de operación de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, se tiene una ΔT de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$V_A = \frac{111321 \text{ kJ/h}}{(1.283 \text{ kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C})(40 \text{ }^\circ\text{C})} = 2169.15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Verduras

Para un suministro energético de 105713.1 kJ/h , temperatura de operación de $90 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, se tiene una ΔT de $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$V_A = \frac{105713.1 \text{ kJ/h}}{(1.283 \text{ kJ/m}^3 \text{ }^\circ\text{C})(60 \text{ }^\circ\text{C})} = 1373.25 \text{ m}^3/\text{h}$$

Granos

Para un suministro energético de 104792.4 kJ/h , temperatura de operación de 60 °C y una temperatura ambiente de 30 °C, se tiene una ΔT de 30 °C.

$$V_A = \frac{104792.4 \text{ kJ/h}}{(1.283 \text{ kJ/m}^3 \text{ }^\circ\text{C})(30 \text{ }^\circ\text{C})} = 2722.58 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.3.2.3. Cálculo de la superficie de captación solar.

Para el cálculo de la superficie 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 producto, 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 7.3 GJ/m² año, con una eficiencia térmica del sistema solar del 70 %. El cálculo de A_C se efectúa con la siguiente relación:

Frutas

$$A_C = \frac{\text{No.días al año}(Q_s)FS}{I(n_{ss})} \quad (3.4)$$

Sustituyendo los valores se tiene:

$$A_C = \frac{365(0.1122855 \text{ GJ})0.80}{7.3 \text{ GJ/m}^2(0.70)} = 6.41 \text{ m}^2$$

Hojas

$$A_C = \frac{365(0.111321 \text{ GJ})0.80}{7.3 \text{ GJ/m}^2(0.70)} = 6.36 \text{ m}^2$$

Verduras

$$A_c = \frac{365(0.1057131 \text{ GJ})0.80}{7.3 \text{ GJ/m}^2(0.70)} = 6.04 \text{ m}^2$$

Granos

$$A_c = \frac{365(0.1047924 \text{ GJ})0.80}{7.3 \text{ GJ/m}^2(0.70)} = 5.98 \text{ m}^2$$

De acuerdo a los calculos realizados (tabla 3.4), se obtuvo el mayor consumo energetico de 112283.55 kJ/h que equivale a 31.19 kW/h, con el cual debido a que es el mayor se cubre todos los requerimientos energéticos para poder deshidratar los productos de los grupos establecidos. Para poder obtener esta energía se requiere de un área de captación solar de 6.41 m², por lo cual se propone emplear 2 colectores solares de tubo de vacío de 3.58 m² cada uno dando como total un área de captación solar de 7.16 m², los colectores tienen una absorción solar del 95 %.

Energía captada por los colectores solares de tubo de vacío.

Área de captación solar= 7.16 m²

Absorción solar del colector= 95 %

Radiación solar en Tuxtla Gutierrez, Chiapas= 4.7 kWh/m²

Energía captada por los colectores

7.16 m² x 4.7 kWh/m²= 33.65 kW/h

33.65 kW/h x 0.95= 31.96 kW/h

Como se observa en los calculos los colectores proporcionan 31.96 kW/h suficiente para cubrir el mayor consumo energetico que es de 31.19 kW/h.

Tabla 3.4. Bases de diseño.

Producto (32 kg)	Humedad a eliminar (kg)	Consumo energético (KJ/h)	Flujo de aire (m³/h)	Área de captación (m²)
Frutas	26.83	112283.55	2187.91	6.41
Hojas	26.60	111321	2169.15	6.36
Verduras	25.26	105713.1	1373.25	6.04
Granos	25.04	104792.4	2722.58	5.98

3.3.3. Dimensiones del sistema.

En este apartado se dan a conocer las dimensiones del sistema híbrido termosolar-eólico, como ya se mencionó el área de captación solar necesaria para tener la energía requerida es de 6.41 m², por lo que se implementan 2 colectores solares de tubo de vacío (heat pipe) con un área total de 7.16 m². Una vez que se tiene el área de captación solar se dimensiona el tamaño de la cámara de secado a partir de la cantidad de producto necesario por bandeja. Para secar 32 kg de producto se dispuso en la cámara de secado de 16 bandejas de 66 cm de largo, 45.7 cm de ancho y 2.5 cm de alto donde cada una cargaría de 1 a 2 kg dependiendo del producto, se propuso una separación entre bandejas de 5 cm para la circulación del aire de secado colocándolas en 2 filas dobles de 4 columnas. De acuerdo a la cantidad, dimensiones y colocación de las bandejas se propuso las dimensiones de la cámara de secado de la siguiente manera; 2 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de alto. Los colectores solares se colocaran en la parte superior de la cámara de secado para captar la radiación solar por lo cual se plantea una estructura para la colocación de estos de 4.8 m de largo, 1.6 m de ancho y 2 m de alto (figura 3.2).

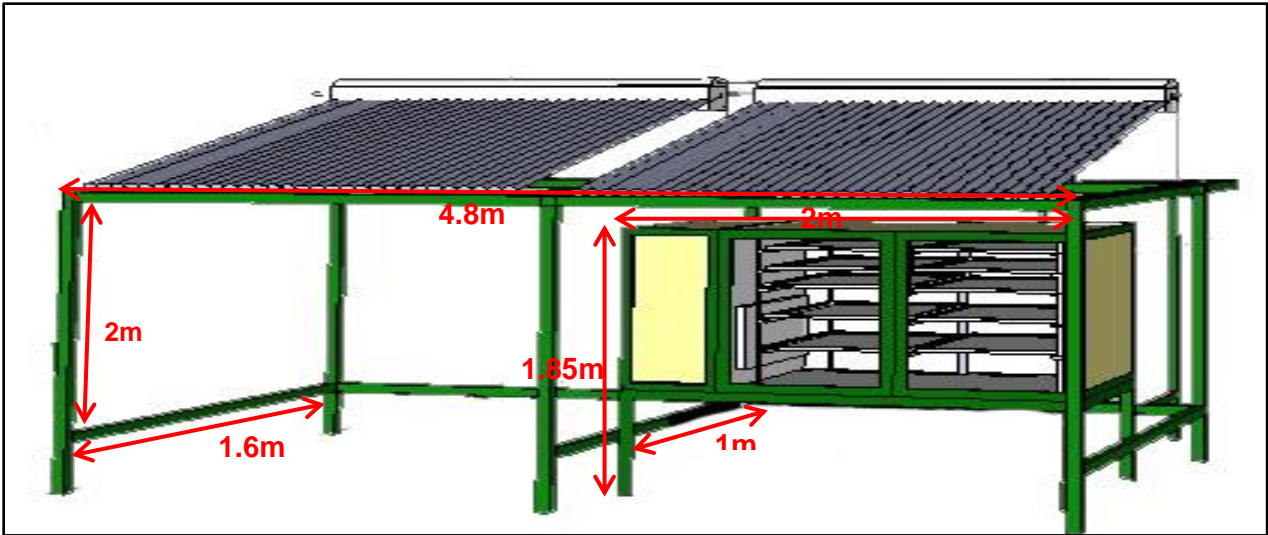


Figura 3.2. Dimensiones del sistema híbrido termosolar eólico para conservación de productos agropecuarios.

3.4. Construcción

3.4.1. Materiales y equipos

Materiales

Se realizó una lista de los materiales empleados para la construcción del secador solar y la estructura de soporte de los colectores solares de tubo de vacío (tabla 3.5). Las paredes, techo y puertas del secador solar están hechas de Multymuro de 1 1/2" de espesor, ángulo estructural, tubular zintro y solera estructural. Mientras que la estructura de soporte de los colectores se construyó de PTR cuadrado.

Tabla 3.5. Materiales para la construcción del secador solar y de la estructura de soporte de los colectores solares.

Material	Cantidad	Unidad
Multymuro de 1 1/2" , 3.5 X 1 m	2	Piezas
Multymuro de 1 1/2" , 3.5 x1 m	1	Pieza
Bandejas de 66 X 45.7 cm	16	Piezas
Hule espuma	10	Metros

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Sellador silicón	4	Piezas
Resistol 5000 21 ml	3	Piezas
Espuma de poliuretano	1	Bote
Armaflex 7/8"	12	Metros
Material eléctrico y electrónico		
Soldadura 1/8" gruesa	2	Kg
soldadura delgada	1	Rollo
Pasta para soldadura	1	Bote
Artículos metálicos para la construcción		
PTR cuadrado	8	Tramos
Angulo estructural de 1- 1/2 x 1/8"	3	Tramo
Angulo estructural de 3/4 x 1/8"	2	Tramos
Tubular zintro	2	Tramos
Tubular zintro 101	4	Tramos
PTR CAL. 1 1/4 x 1/4"	1	Tramos
Solera estructural 1x 1/8 "	2	Tramos
Solera estructural 1/2 x 1/8"	3	Tramos
Angulo estructural de 3/4 x 1/8"	1	Tramo
Lámina galvanizada 1 1/2"	1	Metro
Tubo de cobre de 3/4"	2	tramos
Codos de cobre de 3/4"	10	piezas
Tuercas unión de 3/4"	6	piezas
Válvula esfera	6	piezas
Válvula de nariz	3	piezas
Válvula check	1	pieza
Válvula alivio	1	pieza
Reducción 3/4" a 1/2"	1	pieza
Conector de rosca interior de cobre 3/4"	5	piezas
Conector de rosca exterior de cobre 3/4"	3	piezas
Conector de rosca exterior de cobre 1"	2	piezas
Conector te de cobre 3/4"	5	piezas
Adaptador de 3/4 a 3/4 "	1	pieza
Refacciones, accesorios y herramientas menores		
Disco para esmeril	1	Pieza
Pintura aquidálica secado rápido verde tortuga	4	Litros
Thiner americano	1	Galón
Thiner estándar	5	Litros
Estopa	2	Kg
Jaladeras	2	Piezas

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Pasador	4	Piezas
Fierro hexagonal	10	Piezas
Tuerca hexagonal rosca	10	Piezas
Rondana plana ¼	20	Piezas
Pija P/lamina 8 X 1-1/4 fijadora	100	Piezas
Pija autota	100	Piezas
Disco de corte metales. 350x2.8x2	2	Piezas
Broca 1/8"	1	Pieza
Broca de ½"	1	pieza
Broca de 1"	1	pieza
Cinta de aislar negra	1	Pieza

Equipos

A continuación se presentan los equipos que integran tanto al sistema térmico-solar (secador solar) y al sistema eólico.

El sistema térmico-solar está constituido de: 2 colectores solares de tubo de vacío (heat pipe), 1 termotanque de almacenamiento de agua vertical de 350 litros, 1 intercambiador de calor, 1 ventilador para la circulación de aire, 1 extractor de aire, 1 bomba circuladora de agua caliente y un sistema de medición y control.

Características de los equipos:

Colectores solares de tubo de vacío:

Dimensiones: 1 m alto, 1.6 m largo, 2.24 m ancho

Grado de absorción solar: 95 %

Área de captación solar: 3.58 m²

Ventilador para la circulación de aire 5HXM-250:

RPM: 1550

Caudal: 930 m³/h

Intensidad= 1.03 A

Voltaje= 127 V

Consumo energía por unidad de tiempo en operación: 69.6 Wh

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Extractor de aire de 6”:

Intensidad= 0.21 A

Voltaje= 115 V

Consumo nominal: 18 Wh/ día

Bomba circuladora para agua caliente Aqua pack:

3 velocidades:

V1= 24/6 lpm (70 W)

V2= 27/7 lpm (100 W)

V3= 32/8 lpm (140 W)

Voltaje= 115 V

El sistema eólico está constituido por: 1 aerogenerador horizontal de 900 W, 4 baterías de 12 V, 105 Ah, un inversor de 1500 W con 12 V de CD y 115 V de CA y 2 resistencias eléctricas de 250 y 300 W para suministrar a la cámara una parte de la energía térmica faltante.

3.4.2. Descripción general del prototipo de sistema híbrido termosolar- eólico.

3.4.2.1 Cámara de secado.

Como ya se mencionó la cámara de secado cuenta con las siguientes dimensiones; 2 m de largo, 1 m de ancho y 1.85 m de alto. Construida principalmente de Multymuro de 1 ½” de espesor, ángulo estructural, tubular zintro y solera estructural. En ella se ubicaron 16 bandejas para la colocación del producto, las cuales tienen una separación de 5 cm para la circulación del aire, también se ubicó en una parte lateral de la cámara de secado 1 ventilador para la circulación del aire, 1 intercambiador de calor ubicado en la parte delantera del ventilador , 2 resistencias eléctricas que suministran una parte de la energía térmica a la cámara de secado cuando es requerida ya sea por las noches o días nublados, estas están ubicadas en la parte delantera del intercambiador de calor y 1 extractor de aire ubicado en una parte inferior de la cámara (figura 3.3).



Figura 3.3. Cámara de secado.

3.4.2.2 Estructura general del sistema.

La estructura general del sistema está constituida por la cámara de secado, los colectores solares ubicados en la parte superior de la cámara de secado, el termotanque de almacenamiento de agua ubicado en la parte trasera de los colectores, el sistema de tuberías para la circulación del agua y el aerogenerador ubicado a un costado de la cámara (figura 3.4).



Figura 3.4. Estructura general del sistema híbrido termosolar-eólico.

3.4.2.3. Sistema eólico.

3.4.2.3.1. Cálculo de la demanda de energía eléctrica.

Para determinar la cantidad de energía eléctrica requerida para que el sistema funcione durante 1 hora se toman los consumos eléctricos de los equipos proporcionados por el fabricante y se multiplican por el número de horas de funcionamiento, dando la suma de todos los consumos la demanda total de energía.

Tabla 3.6. Consumos de los componentes eléctricos del sistema termosolar-eólico.

Equipo	Tiempo (h)	Consumo (A/h)	Consumo por hora (A)	Potencia nominal (W)
ventilador	1	1.03	1.03	69.6
Extractor	0.166 (10 min)	0.21	0.03486	18
Bomba	1	0.61	0.61	70
Resistencia de 250 W	1	2.08	2.08	250
Resistencia de 300 W	1	2.5	2.5	300
			Total= 6.25 A	Total=707.6 W

3.4.2.3.2. Descripción del sistema eólico.

El sistema eólico consta de un aerogenerador Whisper 100, el cual cuenta con las siguientes características técnicas:

Tabla 3.7. Características técnicas del aerogenerador Whisper 100.

Modelo	Whisper 100
Diámetro del rotor	210 cm
Peso	21 Km
Voltaje de salida	12, 24, 36 y 48 VDC
Potencia nominal	900 W a 12.5 m/s
Velocidad de arranque	3.4 m/s (12.24 km/h)
Velocidad máxima de soporte	55 m/s (198 Km/h)
Kilowatts hora por mes	100 kWh/mes a 5.4 m/s

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

En la siguiente figura se puede apreciar la energía instantánea generada por el aerogenerador whisper 100 a ciertas velocidades.

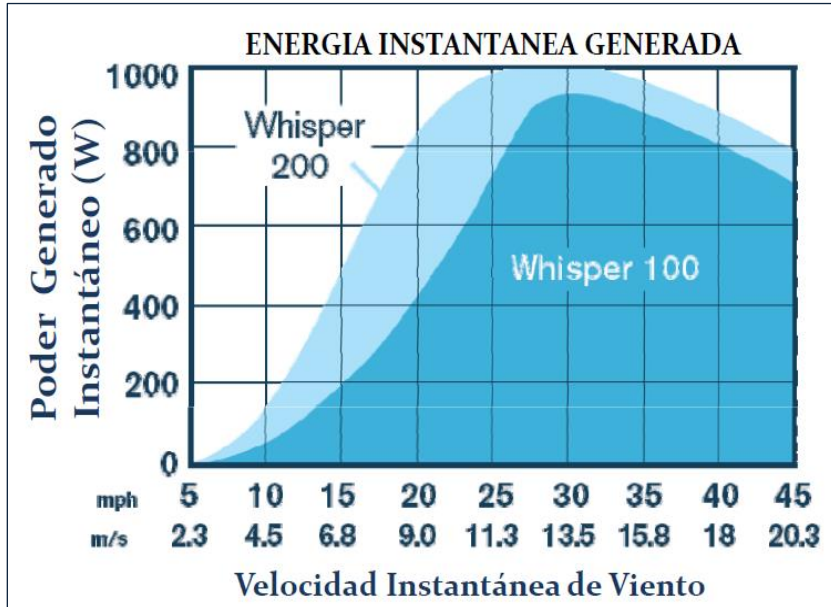


Figura 3.5. Energía instantánea generada por el aerogenerador.

De acuerdo a Conagua [21], la Velocidad del viento máximo media anual de la ciudad donde se instaló el aerogenerador Tuxtla Gutiérrez, Chiapas es de 9.5 m/s. De acuerdo a la figura 3.5, la energía generada con esta velocidad de viento es aproximadamente 500 W.

Para saber cuántas horas se puede mantener funcionando el sistema con 500 W, se consideran 5 horas de viento con esta velocidad:

$$(500 \text{ W}) (5 \text{ h}) = 2500 \text{ Wh/día}$$

Dependiendo del funcionamiento del sistema, se implementa el uso de los componentes eléctricos:

Funcionamiento de día: Se usa el ventilador, la bomba y el extractor, por lo tanto la potencia que consume el sistema es de 157.6 W.

$$2500 \text{ Wh} / 157.6 \text{ W} = 15.8 \text{ horas}$$

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Funcionamiento de noche o días nublados: se usa el ventilador, la bomba, el extractor y las resistencias. Cabe señalar que la bomba y las resistencias no trabajan al mismo tiempo, cuando la bomba está encendida las resistencias están apagadas y viceversa. Pero se considera el consumo de las 2 para asegurar la demanda de energía. La potencia que consume el sistema es 707.6 W.

$$2500 \text{ Wh}/707.6 \text{ W} = 3.5 \text{ horas}$$

Se determina la corriente total para los 2500 Watts dividiendo la potencia generada entre 12 V, el voltaje al cual se configuro el aerogenerador:

$$I = 2500 \text{ W}/12 \text{ V} = 208.3 \text{ Ah /día}$$

3.4.2.3.3. Cálculo del número de baterías.

El número de baterías se determina dividiendo el amperaje que entrega el aerogenerador entre el amperaje de las baterías que se quieren implementar:

$$208.3 \text{ A}/105 \text{ A} = 1.98 \approx 2 \text{ baterías}$$

Se requiere de 2 baterías pero se implementaron 4 considerando que cada batería no se debe descargar más del 50 %, se utilizaron baterías LTH las cuales trabajan con 105 A a 12 V, se conectan a un inversor para utilizarse como fuente de alimentación de los equipos con entrada de 12 V de CD y salida de 115 V de CA. Las baterías se conectan en paralelo para mantener 12 V de la entrada al inversor.

3.5. Sistema de medición y control.

Para el control de las variables principales que intervienen en el proceso de secado, se instalaron los dispositivos descritos a continuación:

Termopar tipo K: Instalado en el termotanque de almacenamiento, para medir la temperatura del agua, cuenta con un margen de trabajo de 0 a 1250 °C y exactitud de $\pm 2.2 \text{ °C}$ o $\pm 0.75 \%$.

Capítulo 3. Diseño y construcción del sistema.

Sensor de humedad y temperatura AM2301: Instalado en la cámara de secado, para medir la temperatura y la humedad, cuenta con un margen de trabajo de -40 a 80 °C para la temperatura y 0 a 100 % para la humedad, con exactitud de ± 0.5 °C para la temperatura y de 3 % para la humedad.

Caja de mando y control: Ubicada afuera de la cámara de secado, consta de la electrónica de control en donde se controlan las variables del proceso y se registran los datos de las mediciones y la etapa de potencia de la cual se obtiene la potencia para que trabajen el ventilador, extractor, bomba y resistencias.

Sistema de adquisición de datos: La adquisición de los datos se realiza de manera automática, las señales captadas por los sistemas de medición se envían a la parte de electrónica de control ubicada en la caja de mando y control, donde se registran los datos cada 2 segundos y a su vez los guarda en una SD.

Equipo de medición externo al prototipo.

Estación meteorológica: Para estudiar el proceso de secado es necesario contar con variables externas como lo son la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Estos datos se obtuvieron de la estación meteorológica vantage pro ubicada en el centro de investigación y desarrollo tecnológico en energías renovables (CIDTER) de la Universidad de ciencias y artes de Chiapas.



Figura 3.6. Sistema de medición y control.

3.6. Conclusión.

El sistema híbrido termosolar eólico para la conservación de productos agropecuarios se diseñó con base al potencial energético disponible y las necesidades energéticas de los productos, de acuerdo a esto se obtuvo un secador híbrido termosolar-eólico el cual está constituido por dos colectores solares de tubo de vacío con un área de captación solar total de 7.16 m^2 , un termotanque de almacenamiento de agua de 350 litros y un aerogenerador whisper de 900 W.

La cámara de secado mide 2 m de largo, 1 m de ancho y alto. Cuenta con una estructura para la colocación de los colectores solares la cual mide 4.8 m de largo, 1.6 m de ancho y 2 m de alto. Además el secado híbrido cuenta con un sistema de medición y control para establecer y controlar los parámetros de secado en la cámara.

Capítulo 4. Funcionamiento y eficiencia térmica del sistema.

4.1. Introducción.

En este capítulo se presenta el funcionamiento del sistema híbrido termosolar-eólico el cual consiste de la cámara de secado en donde se deshidrata el producto y la cual está diseñada para establecer las condiciones de secado de cada producto que se procese en ella y debe funcionar durante el día y la noche de manera continua, el suministro de energía térmica será preferentemente solar obtenida a través de los colectores solares de tubo de vacío, mientras que los requerimientos de energía eléctrica serán cubiertos por el aerogenerador, el sistema también cuenta con 2 resistencias eléctricas que se aportan como sistema térmico auxiliar las cuales operaran con energía suministrada por el aerogenerador. El sistema cuenta con un sistema de control, el cual permite establecer y mantener constantes los parámetros de secado de acuerdo al producto que se vaya a procesar como lo son: la temperatura y humedad en la cámara.

También se presenta la determinación de la eficiencia térmica diaria del sistema, la cual está en función de la capacidad de transformar la radiación solar en calor y la capacidad de aprovechar ese calor para calentar el aire y evaporar el agua en el producto.

4.2. Funcionamiento.

El funcionamiento del sistema híbrido se da de la siguiente manera: En la cámara de secado se hace circula aire caliente de manera forzada con un ventilador. El aire caliente se obtiene de la transferencia del calor del agua calentada por los colectores y almacenada en el termotanque, dicha transferencia de calor se realiza mediante el intercambiador. La circulación del agua en diferentes partes del sistema es con circulación natural (colectores - termotanque) y circulación forzada (termotanque - intercambiador- termotanque). También una parte de la energía térmica faltante

durante días nublados o por las noches será suministrada por 2 resistencias eléctricas alimentadas con energía generada por el aerogenerador.

4.2.1 Funcionamiento de día.

Durante el día el suministro de energía térmica en la cámara de secado se llevará a cabo a través de los colectores. El agua fría almacenada en la parte inferior del termotanque se hace circular a través de los colectores provocando su calentamiento y es conducida de nuevo al termotanque almacenándose en la parte superior debido a la diferencia de densidades del agua, ya que el agua caliente es más densa que la fría tiende a estar en la parte superior del termotanque, esta agua caliente se hace circular mediante la bomba hacia el intercambiador de calor donde el agua cede su calor al aire el cual se hace circular en la cámara de secado con el uso del ventilador para extraer la humedad al producto que se esté deshidratando. El agua que sale del intercambiador de calor es conducida con la bomba hacia la parte inferior del termotanque y se vuelve a repetir el proceso (figura 4.1).

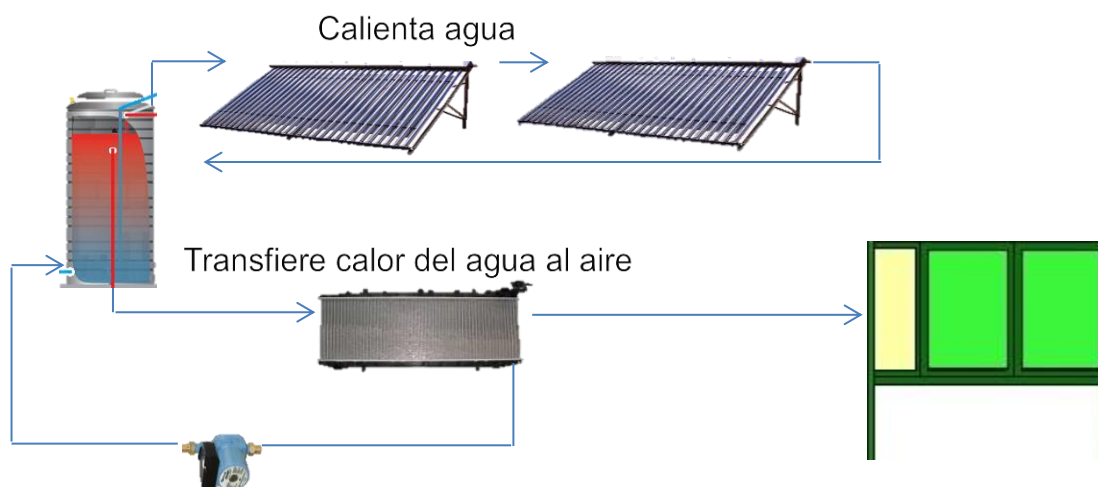


Figura 4.1.Funcionamiento del sistema híbrido durante el día.

4.2.2. Funcionamiento de noche o días nublados.

Durante la noche o días nublados la energía térmica proporcionada a la cámara de secado es obtenida principalmente del sistema solar. Durante el día el agua se calienta por los colectores solares y se almacena en el termotanque para su posterior uso por la noche o días nublados. A si mismo de ser necesario se emplea el uso del sistema auxiliar (resistencias eléctricas) para que proporcionen la energía térmica que falte para mantener estables las condiciones de secado en la cámara. El proceso para proporcionar la energía térmica a la cámara es el siguiente: El agua caliente almacenada en el termotanque se hace circular con la bomba hacia el intercambiador de calor donde el agua cede su calor al aire el cual se hace circular en la cámara de secado con el uso del ventilador. El agua que sale del intercambiador de calor es conducida con la bomba hacia la parte inferior del termotanque y se vuelve a repetir el proceso (figura 4.2).

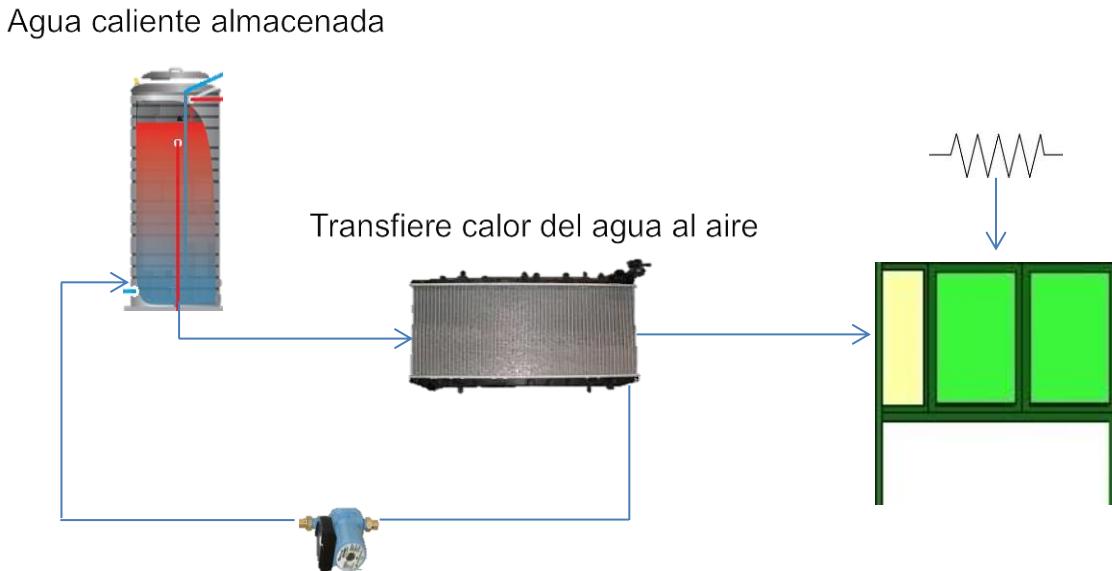


Figura 4.2. Funcionamiento del sistema híbrido durante la noche o días nublados.

4.3. Determinación de la eficiencia térmica del sistema.

La eficiencia térmica de un secador solar está en función de la capacidad de transformar la radiación solar en calor y la capacidad de aprovechar ese calor para calentar el aire y evaporar el agua en el producto.

De acuerdo a la eficiencia de primera ley hay un límite superior de energía con el cual la radiación solar puede transferir el máximo trabajo útil de un espectro de frecuencia e intensidad. La energía sobre el área de captación está dada por:

$$Q_c = AI \quad (4.1)$$

Donde Q_c es la energía incidente sobre los colectores, A el área de los colectores expuesta al sol, e I es la intensidad de la radiación solar en un sitio particular. La energía transmitida de los colectores absorbida por el fluido está dada por:

$$Q_f = mC_p\Delta T \quad (4.2)$$

Donde Q_f es la energía absorbida por el aire, C_p la capacidad calorífica del aire, ΔT la diferencia de temperaturas ($T_f - T_i$) donde; T_f es la temperatura final del fluido, T_i es la temperatura inicial del fluido, y m la masa del aire. La primera ley de la eficiencia de un sistema está dada por:

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_c} \quad (4.3)$$

Donde η es la abreviación usada para la primera ley de eficiencia de un sistema [22].

Para el cálculo de la eficiencia térmica diaria del secador híbrido termosolar- eólico para la conservación de productos agropecuarios, se parte del concepto anterior, determinando la energía incidente diaria sobre los colectores Q_c dada por la ecuación 4.1.

Capítulo 4. Funcionamiento y eficiencia térmica del sistema.

Se considera la energía transmitida de los colectores absorbida por el agua almacenada en el termotanque calculando Q_{agua} de la siguiente manera;

$$Q_{agua} = mC_p\Delta T \quad (4.4)$$

Donde;

Q_{agua} es la energía absorbida por el agua almacenada en el termotanque

C_p la capacidad calorífica del agua

m la masa del agua

$\Delta T = (T_f - T_i)$ donde;

T_f es la temperatura final en este caso la temperatura del agua caliente

T_i es la temperatura inicial en este caso la temperatura ambiente

Y tomando en cuenta la diferencia de calor en el agua en horas con y sin radiación solar.

$$\Delta Q_{agua} = (Q_r - Q_s) \quad (4.5)$$

Donde Q_r es el calor en el agua en horas con radiación solar y Q_s es el calor en el agua en horas sin radiación solar.

En el secador existe un aporte adicional de energía, dado mediante la energía eléctrica que se usa para mantener trabajando a las resistencias eléctricas, la bomba y el ventilador y es necesario considerarlo;

$$E_{elect} = E_v + E_b + E_r \quad (4.6)$$

Donde E_{elect} es la energía eléctrica adicional suministrada, E_v la energía eléctrica que consume el ventilador, E_b la energía eléctrica que consume la bomba, y E_r la energía eléctrica que consumen las resistencias. Para la determinación de la eficiencia térmica del secador híbrido termosolar-eólico se obtiene la siguiente ecuación;

$$\eta_{diaria} = \frac{\Delta Q_{agua}}{Q_c + E_{elect}} \quad (4.7)$$

La eficiencia térmica diaria del secador híbrido se determinó dependiendo de la temperatura controlada en la cámara de secado obteniéndose una eficiencia térmica de 44.78, 39.88, 37.86 y 27.68 % para 40, 50, 60 y 70 °C respectivamente.

4.4. Conclusión.

En este capítulo se estableció el funcionamiento del sistema híbrido termosolar-eólico el cual se basa principalmente en la circulación de aire caliente en la cámara de secado, este se da de dos maneras; funcionamiento de día, el suministro de energía se lleva a cabo a través de los colectores de tubo de vacío que calientan el agua almacenada en el termotanque haciéndola circular en el intercambiador de calor para ceder su calor al aire en la cámara y funcionamiento de noche o días nublados, mediante el cual el suministro de energía del agua caliente almacenada en el termotanque que se hace circular en el intercambiador de calor para transferir calor al aire y de no ser suficiente se emplea el sistema auxiliar para proporcionar el calor necesario a la cámara de secado. También se estableció la metodología para determinar la eficiencia del sistema.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

5.1. Introducción.

En este capítulo se presenta la evaluación del funcionamiento del sistema desarrollado, principalmente del comportamiento térmico en la cámara de secado, por lo cual se hizo la evaluación en vacío con cada uno de los sistemas que suministran la energía a la cámara de secado por separado y en conjunto, así como la evaluación con producto.

Para la evaluación de la cámara de secado en vacío con el sistema solar (colectores de tubos de vacío), se hizo circular agua caliente del termotanque de almacenamiento al intercambiador de calor, para proveer el calor a la cámara de secado. Las pruebas se realizaron con un flujo de agua de $24/6 \text{ lpm}$ y velocidad de aire en la cámara de secado de 1550 RPM . Para la evaluación de la cámara de secado en vacío con el sistema auxiliar eólico (resistencias eléctricas), se suministró con las resistencias eléctricas calor a la cámara de secado haciendo circular el aire caliente a la misma velocidad de 1550 RPM . En las pruebas anteriores se evaluó la máxima temperatura alcanzada en la cámara de secado.

Para la evaluación en vacío del sistema híbrido solar-eólico, se suministró calor a la cámara de secado con el agua caliente calentada por los colectores solares y se suministró calor con las resistencias eléctricas únicamente cuando el calor suministrado por el agua caliente no fue suficiente para mantener la temperatura establecida en la cámara de secado. En estas pruebas se controló la temperatura en la cámara de secado a: $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la evaluación con producto, se deshidrató manzana a diferentes temperaturas de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para realizar la evaluación del comportamiento térmico en la cámara de secado se necesita obtener información de la temperatura del agua caliente que se hace circular a través del intercambiador de calor, de la temperatura y humedad en la cámara de

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

secado, así como de algunos parámetros climáticos como lo son: La radiación solar, velocidad del aire, temperatura y humedad ambiente. Para la medición de los parámetros anteriores se instalaron: un termopar tipo K en el termotanque de almacenamiento para medir la temperatura del agua caliente, un sensor de humedad y temperatura AM2301 en la cámara de secado para medir la temperatura y humedad en su interior, todos estos conectados al sistema de adquisición de datos para monitorearlos y guardarlos durante la prueba.

Los datos de los parámetros climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica vantage pro ubicada en el centro de investigación y desarrollo tecnológico en energías renovables (CIDTER) de la Universidad de ciencias y artes de Chiapas.

5.2. Evaluación en vacío.

5.2.1. Evaluación con sistema solar (colectores de tubos de vacío).

A continuación se presentan 3 evaluaciones para analizar el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado con diferente radiación solar.

Evaluación en vacío con sistema solar del día 18 al 22 de diciembre de 2014.

La figura 5.1, representa las variaciones de la temperatura en la cámara de secado, temperatura ambiente y temperatura del agua, en un período de 90 horas. La prueba inicio a las 2:00 p.m., con una temperatura inicial en la cámara de secado de 40 °C y alcanzo una temperatura máxima de 76.5 °C en el primer día, 69 °C en el segundo día y 59 °C en el tercer y cuarto día. Mientras que la mayor temperatura del agua fue de 90.5 °C, 75 °C, 66.25 °C y 68.75 °C en el primero, segundo, tercero y cuarto día respectivamente. Se puede observar que la máxima temperatura ambiente durante el primer día fue de 30.4 °C, 32 °C en el segundo día, 28.5 °C en el tercer día y 30.2 °C en el cuarto día. En esta figura se puede apreciar la fuerte dependencia de las temperaturas en la cámara de secado y del agua con respecto a la radiación solar, entre las 11:30 a.m. y 1:30 p.m. se obtuvo la máxima radiación solar la cual estuvo

entre 650 y 750 W/m², en este mismo período de tiempo fue cuando se obtuvieron las máximas temperaturas en la cámara de secado y del agua, cuando la radiación solar desciende las temperaturas disminuyen.

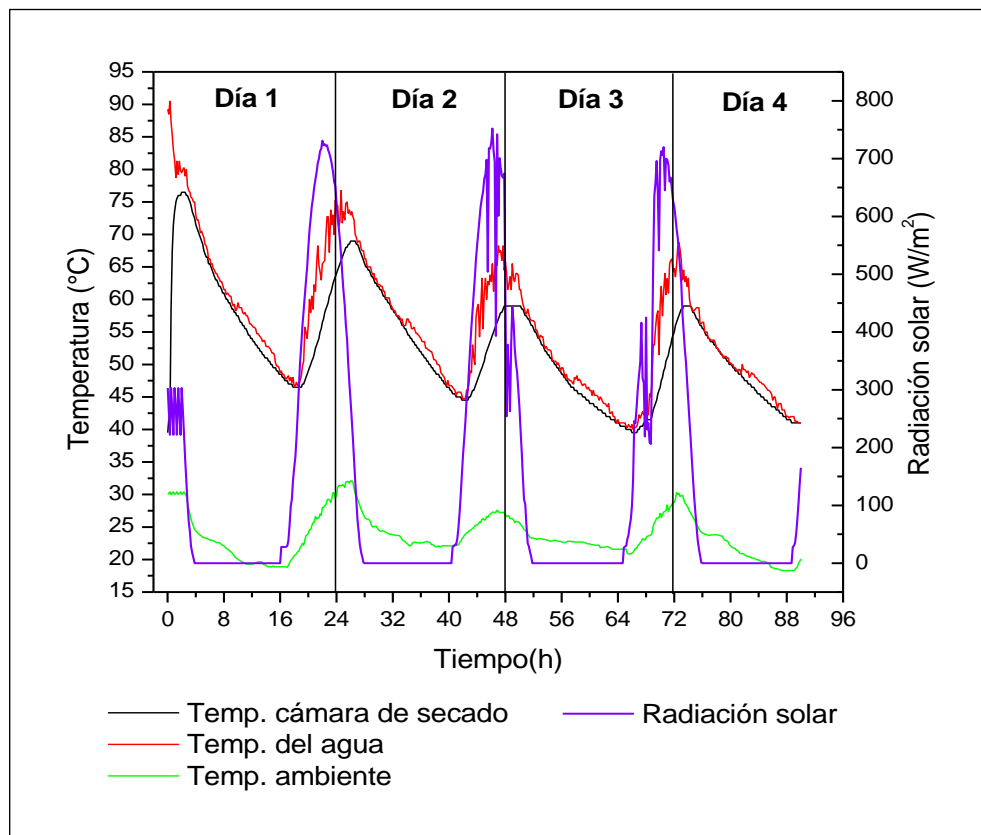


Figura 5.1. Variación de las temperaturas en un período de 90 horas en función de la radiación solar.

En la figura 5.2, se presentan las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente de los días en que se realizó la prueba. Como se aprecia la humedad relativa inicial en la cámara de secado fue de 34.5 %, después de 50 minutos de mantener trabajando el sistema descendió hasta 6.5 % manteniéndose entre 6.5 % y 7.5 % durante un período de 4 horas 30 minutos, posteriormente hubo un incremento constante llegando hasta 19.5 % el cual disminuyó nuevamente de manera constante hasta 6 %, como se observa los niveles bajos de humedad relativa en la cámara de secado se tuvieron durante las horas del día, mientras que incrementos ocurrieron durante las horas de la noche.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

La máxima humedad ambiente durante los días de la evaluación estuvo en un rango de 75 a 90 %, el cual fue alto debido a la baja radiación solar que se tuvo durante estos días.

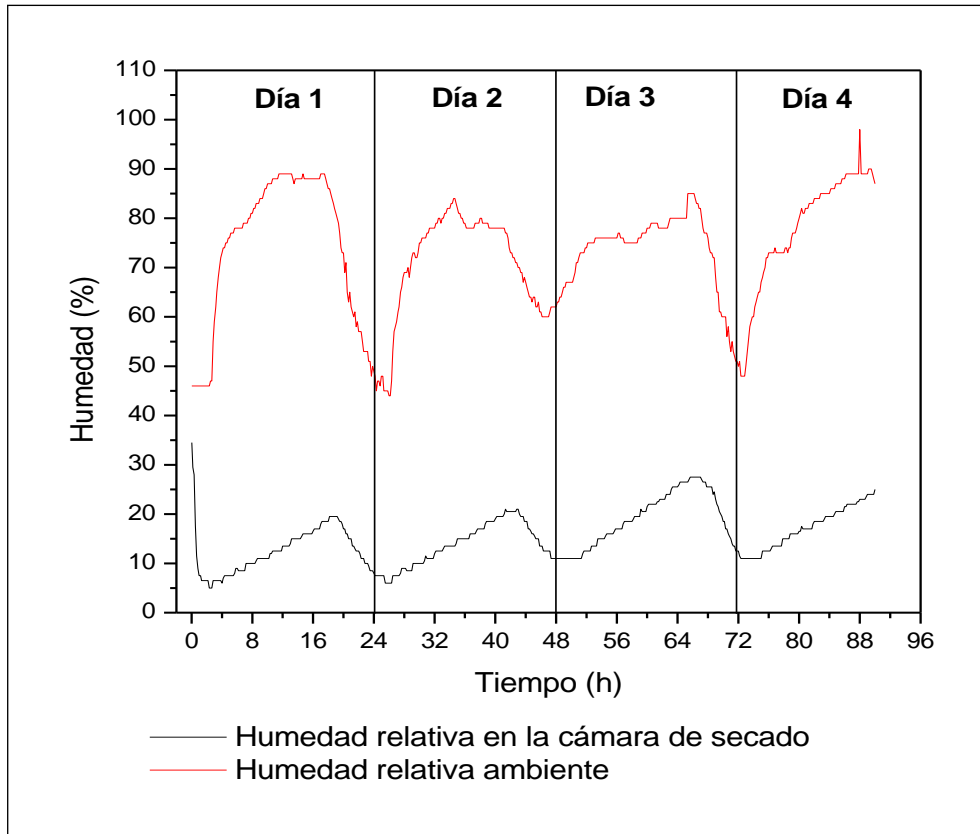


Figura 5.2. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 90 horas.

En la figura 5.3, se muestra la variación de la velocidad del viento de los días en los que se realizó la prueba, con la finalidad de estimar cuantas horas de viento favorables se tuvieron para generar energía eléctrica durante ese período, puesto que el aerogenerador tiene una velocidad de arranque de 3.4 m/s. Se observa que al inicio de la prueba a las 2 p.m. no hubo viento, después de 2 horas 40 minutos se observa la presencia de viento con una velocidad máxima entre 3.4 y 4 m/s la cual se mantuvo durante 2 horas 10 minutos en el primer día, en el segundo día hubo grandes oscilaciones, la velocidad del viento máxima fue de 3.5 m/s en un instante, en el tercer

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

día la velocidad del viento estuvo por encima de 3.4 m/s en un período de 10 horas alcanzando una máxima de 4.9 m/s, en el cuarto día la velocidad máxima estuvo en un rango de 3.6 a 4 m/s y se mantuvo durante 2 horas. Teniendo un total de 14 horas y 10 minutos de viento favorable para generar energía eléctrica.

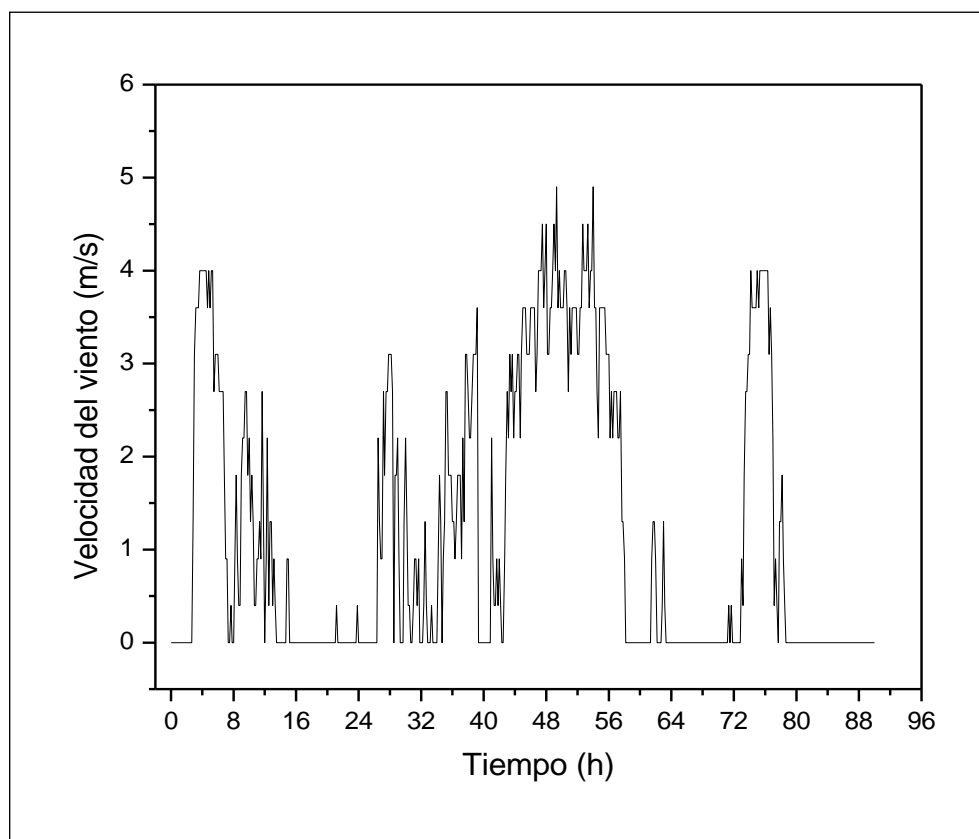


Figura 5.3. Variación de la velocidad del viento en un período de 90 horas.

Evaluación en vacío con sistema solar del día 7 al 10 de enero de 2015.

La figura 5.4, muestra las variaciones de la temperatura en la cámara de secado, la temperatura ambiente y la temperatura del agua, en un período de 67 horas. La prueba inicio a las 2:50 p.m., con una temperatura inicial en la cámara de secado de 35 °C alcanzando una temperatura máxima de 73.6 °C en el primer día, 56.3 °C en el segundo día y 45.4 °C en el tercer día. La mayor temperatura del agua fue de 91.5 °C, 64.5 °C y 56 °C en el primero, segundo y tercer día respectivamente. Mientras que la

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

máxima temperatura ambiente estuvieron entre 23.1 Y 28 °C. Como se puede apreciar, la radiación solar máxima en el primer día fue de 600 W/m², en el segundo día estuvo entre 700 y 791 W/m² de las 12:00 a 1:20 p.m. y en el tercer día alcanzó una máxima de 755 W/m² a las 12:50 pm. A pesar de que se tuvieron índices más altos de radiación solar que en el caso anterior, las temperaturas máximas en la cámara de secado y del agua fueron menores debido a que los índices máximos de radiación se mantuvieron por períodos de tiempo más cortos.

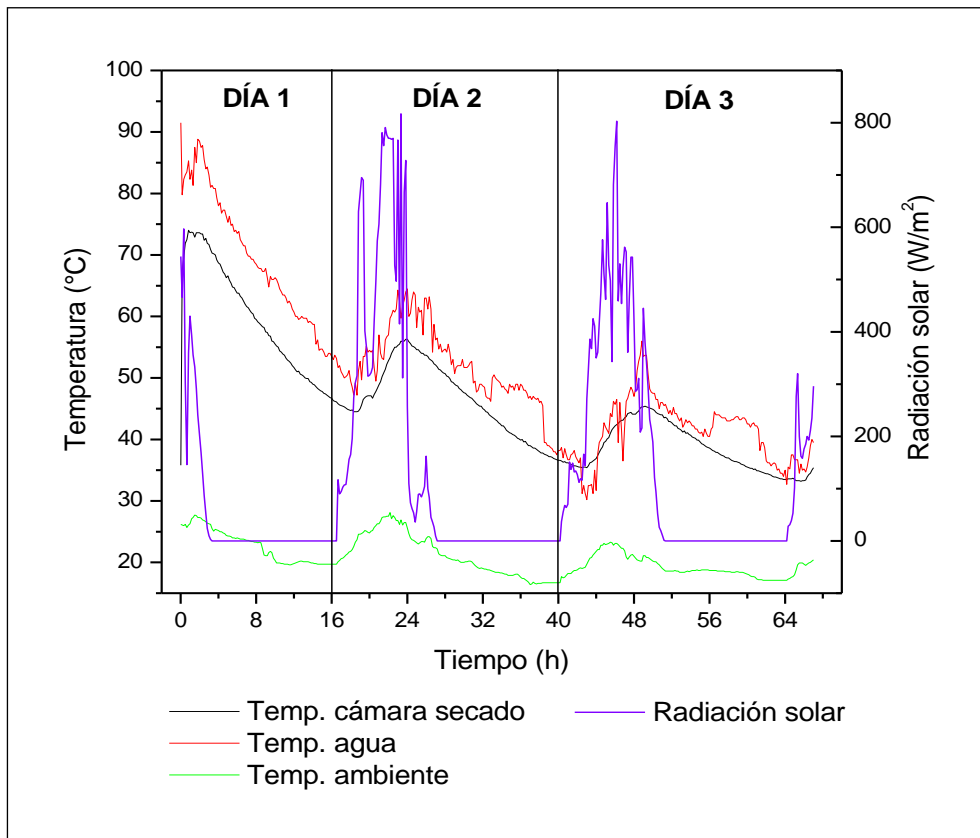


Figura 5.4. Variación de las temperaturas en un período de 67 horas en función de la radiación solar.

En la figura 5.5, se representan las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente de los días en que se realizó la prueba. Como se aprecia la humedad relativa inicial en la cámara de secado fue de 26.3 %, después descendió hasta 5 % en el primer día manteniéndose así durante un período de 12 horas, posteriormente hubo un incremento constante llegando hasta 11.5 % en el Sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios. **70**

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

segundo día el cual disminuyó nuevamente de manera constante hasta 5 % y se mantuvo durante 7 horas y después volvió a incrementar llegando hasta un máximo de 24 % en el tercer día, en el cual se presentó un mayor índice de humedad relativa en la cámara. Mientras que los niveles máximos de humedad ambiente estuvieron en un rango de 70 a 88 %.

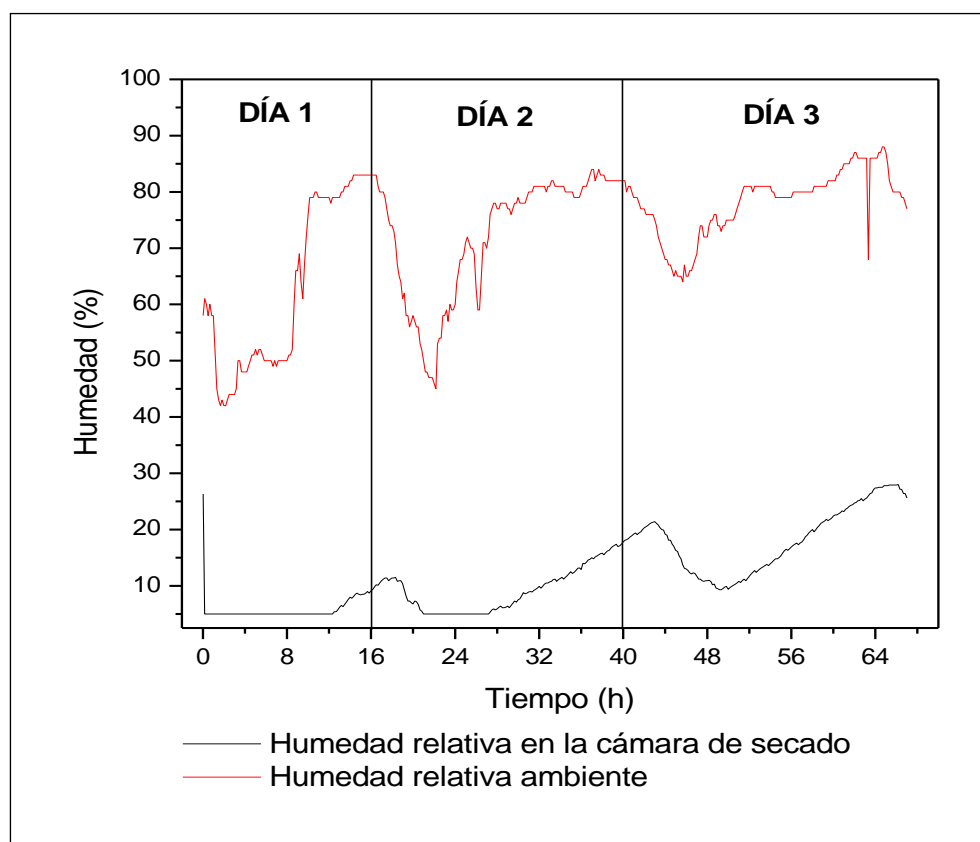


Figura 5.5. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 67 horas.

En la figura 5.6, se presenta la velocidad del viento de los días en los que se realizó la prueba, con la finalidad de estimar cuantas horas de viento favorables se tuvieron para generar energía eléctrica durante ese período. Se observa que al inicio de la prueba había un viento con velocidad de 6.7 m/s y se mantuvo con oscilaciones mayores a 3.4 m/s desde que inicio la evaluación hasta 12 horas después, en el segundo día se tuvieron un total de 5 horas con 40 minutos con velocidad mayor a 3.4 m/s y en el

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

tercer día la velocidad del viento estuvo por encima de 3.4 m/s en un período de 2 horas 40 minutos. Teniendo un total de 20 horas y 20 minutos de viento favorable para generar energía eléctrica.

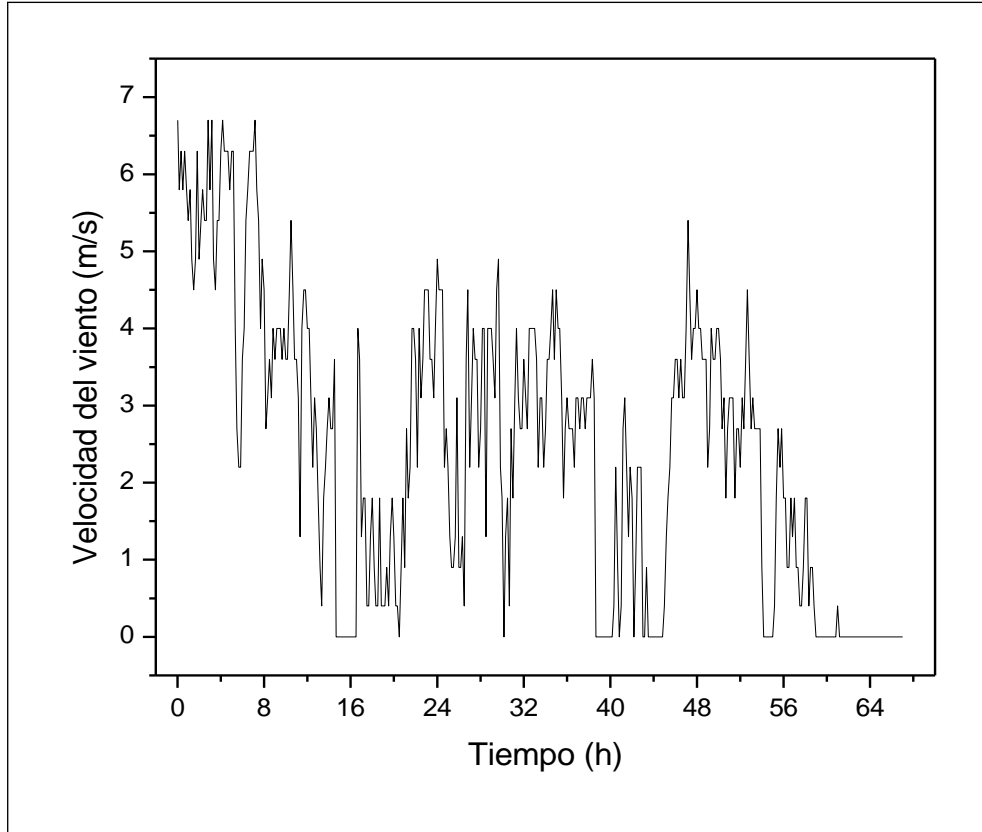


Figura 5.6. Variación de la velocidad del viento en un período de 67 horas.

Evaluación en vacío con sistema solar del día 12 al 15 de enero del 2014.

En la figura 5.7, se observa las variaciones de la temperatura en la cámara de secado, del agua y ambiente, en un período de 72 horas. La prueba inicio a las 7:00 a.m., con una temperatura inicial en la cámara de secado de 17.8 °C y alcanzo una temperatura máxima de 61.6 °C en el primer día, 54.5 °C en el segundo día y 44.9 °C en el tercer día. Mientras que la mayor temperatura del agua fue de 75 °C, 71.3 °C y 61.5 °C en el primero, segundo y tercer día respectivamente. Al igual que en el caso anterior aunque los índices máximos de radiación solar fueron altos (entre 700 y 1000 W/m²) las temperaturas máximas alcanzadas en la cámara de secado, del agua y ambiente Sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios. **72**

fueron menores a las obtenidas en los dos casos anteriores debido a que los valores máximos de radiación solar se mantuvieron por períodos muy cortos de tiempo, como se puede observar en la mayor parte de los días se mantuvo una radiación solar baja.

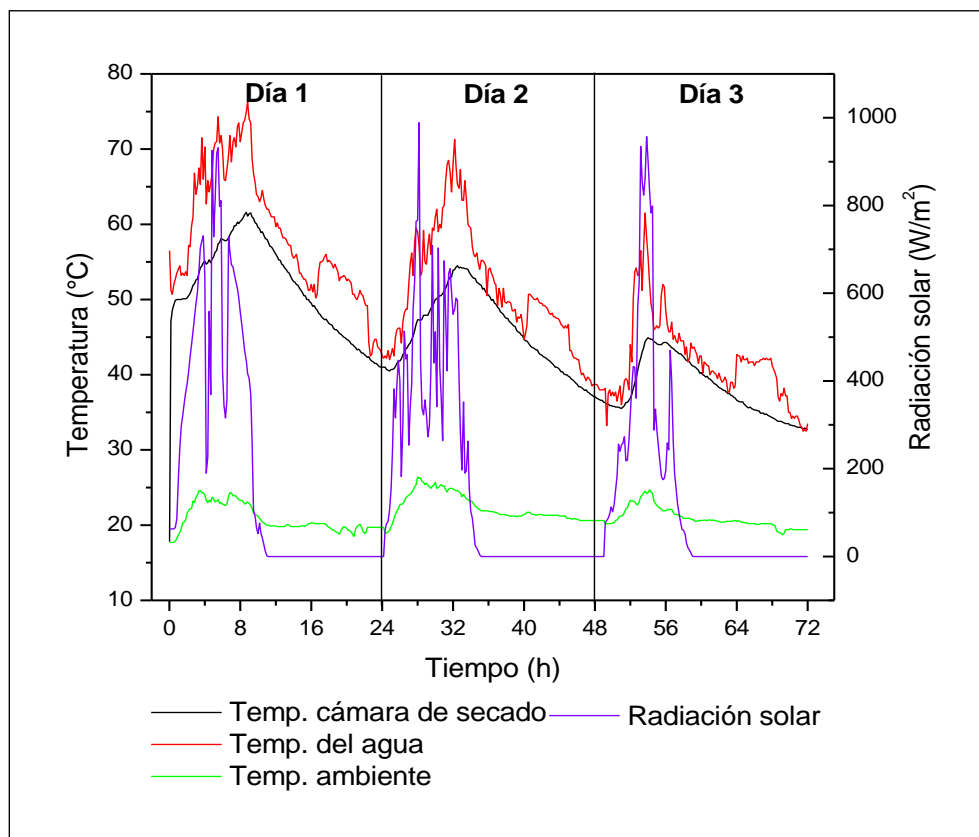


Figura 5.7. Variación de las temperaturas en un período de 72 horas en función de la radiación solar.

La figura 5.8, muestra las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente de los días en que se realizó la prueba. Como se aprecia se tenía un alto contenido de humedad relativa inicial en la cámara de secado de 75.7 %, el cual disminuyó rápidamente hasta 5 % en el primer día manteniéndose así durante un período de 10 horas 50 minutos, posteriormente hubo un incremento constante durante la noche llegando hasta 17.9 % en el segundo día en el cual se mantuvo una humedad superior a la del día anterior, en el tercer día el contenido de humedad en la cámara se mantuvo en un rango de 13.9 a 31.1 %, en el cual se

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

presentó un mayor índice de humedad relativa en la cámara. Mientras que los niveles máximos de humedad ambiente estuvieron en un rango de 80 a 87 %.

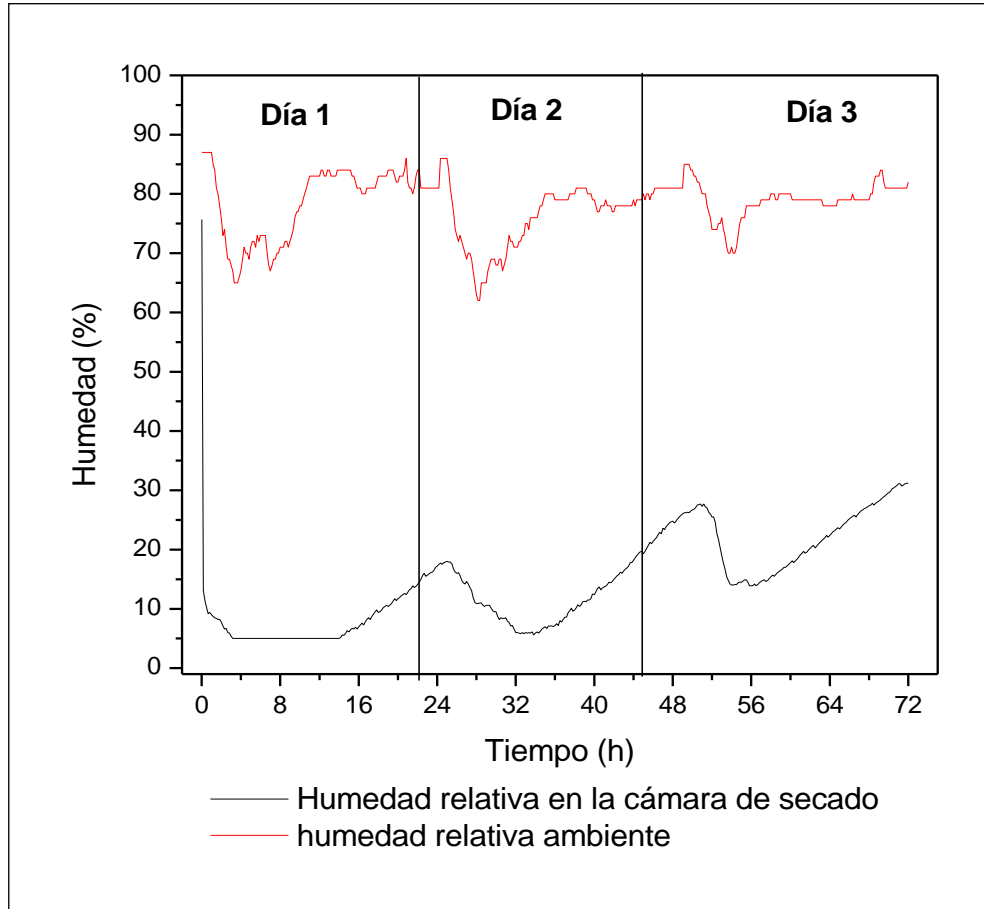


Figura 5.8. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente en un período de 72 horas.

En la figura 5.9, se presenta la velocidad del viento de los días en los que se realizó la prueba. Se observa que en el primer día se tuvo un total de 10 horas 20 minutos con velocidad del viento mayores a 3.4 m/s, en el segundo día se tuvo 8 horas 30 minutos con velocidad del viento superior a los 3.4 m/s llegando a una máxima de 6.5 m/s y en el tercer día la velocidad del viento estuvo por encima de 3.4 m/s durante 3 horas 50 minutos. Teniendo un total de 22 horas y 40 minutos de viento favorable para generar energía eléctrica.

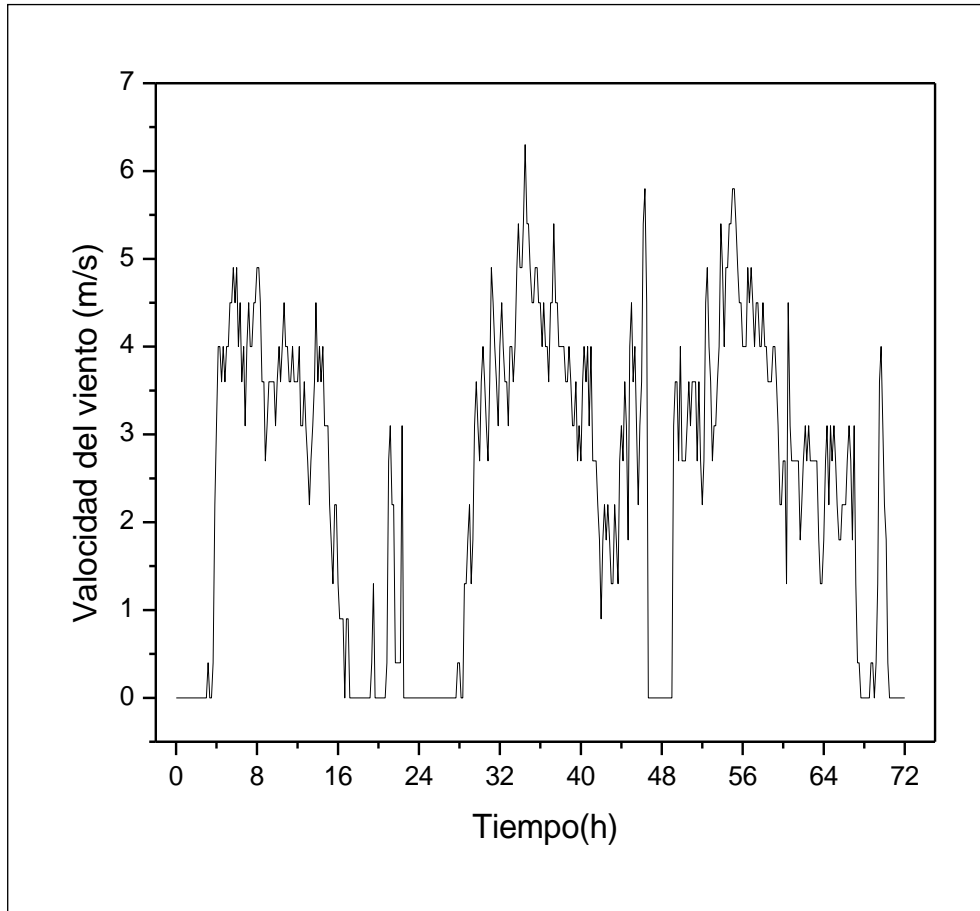


Figura 5.9. Variación de la velocidad del viento en un período de 72 horas.

5.2.2. Evaluación con sistema auxiliar eólico (resistencias eléctricas).

Para esta evaluación se suministró calor con el sistema auxiliar (resistencias eléctricas) a la cámara de secado esto con la finalidad de evaluar la máxima temperatura alcanzada en ella.

La figura 5.10, representa la variación de la temperatura en la cámara de secado, en un período de 4 horas y 15 minutos. Como observa la máxima temperatura alcanzada en la cámara de secado con el sistema auxiliar fue de 77.1 °C y se alcanzó a las 3 horas con 20 minutos, después de llegar a esta temperatura permanece constante lo cual indica que las resistencias eléctricas alcanzaron su punto de saturación.

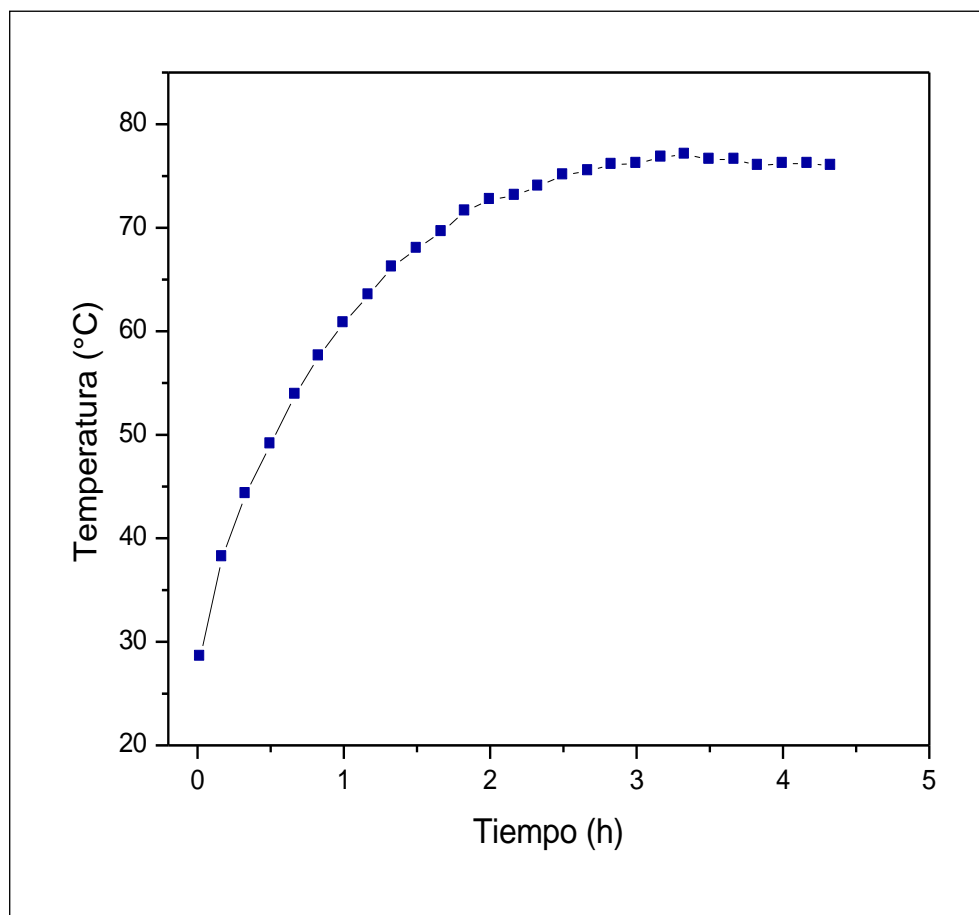


Figura 5.10. Variación de la temperatura en la cámara de secado con el sistema auxiliar.

5.2.3. Evaluación del sistema híbrido solar- eólico.

El objetivo de esta evaluación fue controlar la temperatura en la cámara de secado, para lo cual se suministró calor a la cámara de secado con el agua caliente calentada a través del sistema solar (colectores solares de tubos de vacío) y también se suministró calor con el sistema auxiliar (resistencias eléctricas) esto únicamente cuando el calor suministrado por el agua caliente no fue suficiente para mantener la temperatura establecida en la cámara de secado. En esta evaluación se controló la temperatura en la cámara de secado a: 40 °C, 50 °C, 60 °C y 70 °C con un margen de error de ± 2 °C para las temperaturas de 40, 50 y 60 °C y un margen de 0 a -2 °C para 70 °C.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

A continuación se presentan las gráficas en las cuales se puede apreciar el control de las temperaturas dentro de la cámara de secado, y también se presentan las variaciones de la temperatura ambiente, temperatura del agua, la humedad ambiente, humedad en la cámara de secado y variaciones de los parámetros climáticos.

5.2.3.1. Control de temperatura a 40 °C en la cámara de secado.

Las siguientes figuras muestran la evaluación del 29 al 30 de enero de 2015, la cual se realizó durante un período de 24 horas, iniciando a la 7 a.m.

Para mantener una temperatura estable de 40 °C en la cámara de secado se estableció una condición, cuando la temperatura del agua fue mayor o igual a 50 °C se proporcionó calor a la cámara de secado con el agua caliente (sistema solar) y cuando la temperatura del agua fuera menor a 50 °C se proporcionaría calor a la cámara de secado con las resistencias eléctricas (sistema auxiliar) , ya que con temperaturas del agua menores a 50 °C no se logra mantener estable 40 °C en la cámara de secado.

La figura 5.11, representa el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. Como se aprecia al inicio de la evaluación la temperatura en la cámara de secado era de 14.4 °C después de 10 minutos aumento a 40 °C manteniéndose durante las 24 horas esta temperatura con un margen de ± 2 °C. La temperatura máxima del agua estuvo en un rango de 90 a 97.5 °C durante 5 horas y 20 minutos, manteniendo durante las 24 horas temperaturas superiores a 50 °C lo que permitió controlar la temperatura en la cámara de secado utilizando únicamente el sistema solar. Los índices más altos de radiación solar estuvieron entre 700 y 865 W/m² a partir de la 4^a a la 7^a hora (11:00 am a 2:00 p.m.), se puede observar que durante este período de mayor radiación y por lo tanto mayor temperatura del agua transcurrían períodos de tiempo más largos para disipar 2 °C en la cámara de secado.

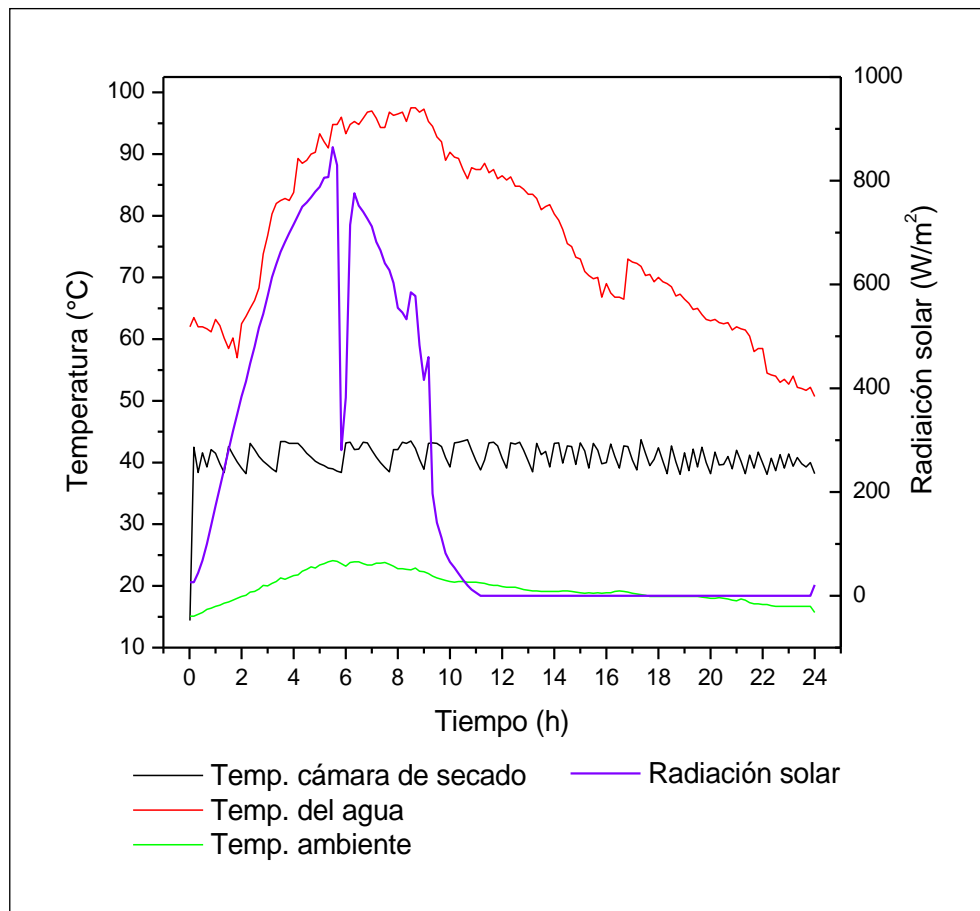


Figura 5.11. Control de la temperatura en la cámara de secado a 40 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.

La figura 5.12, Presenta las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad ambiente. Como se aprecia, la humedad relativa inicial en la cámara de secado fue alta de 70.6 % pero disminuyó rápidamente manteniéndose en un rango de 5 % a 14.5 % durante las 24 horas. Mientras que la humedad ambiente fue superior a 70 % casi durante todo el período de evaluación.

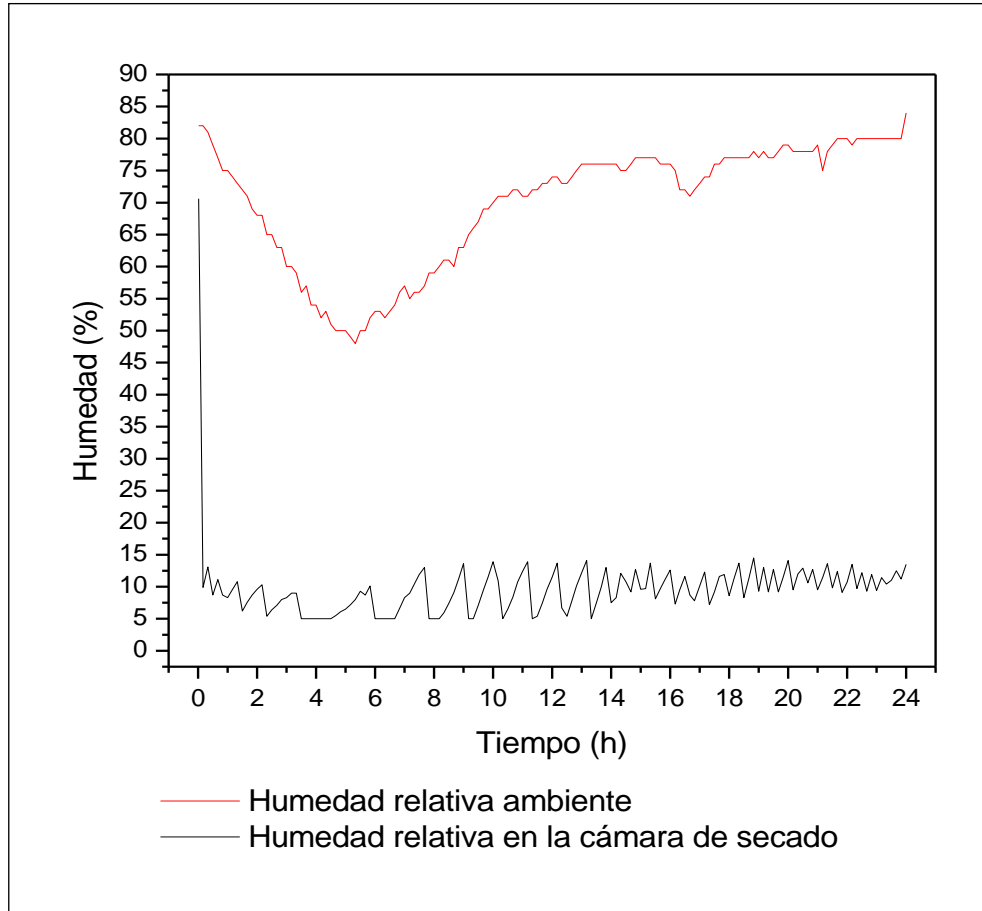


Figura 5.12. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad ambiente del 29 al 30 de enero de 2015.

En la figura 5.13, se observa la variación de la velocidad del viento del día en el que se realizó la evaluación. Como se aprecia desde el inicio hasta la 7^a hora hubo una velocidad del viento baja en un rango de 0 a 3.1 m/s, mientras que las velocidades superiores estuvieron en un rango de 3.4 a 5.4 m/s durante un total de 5 horas, 40 minutos.

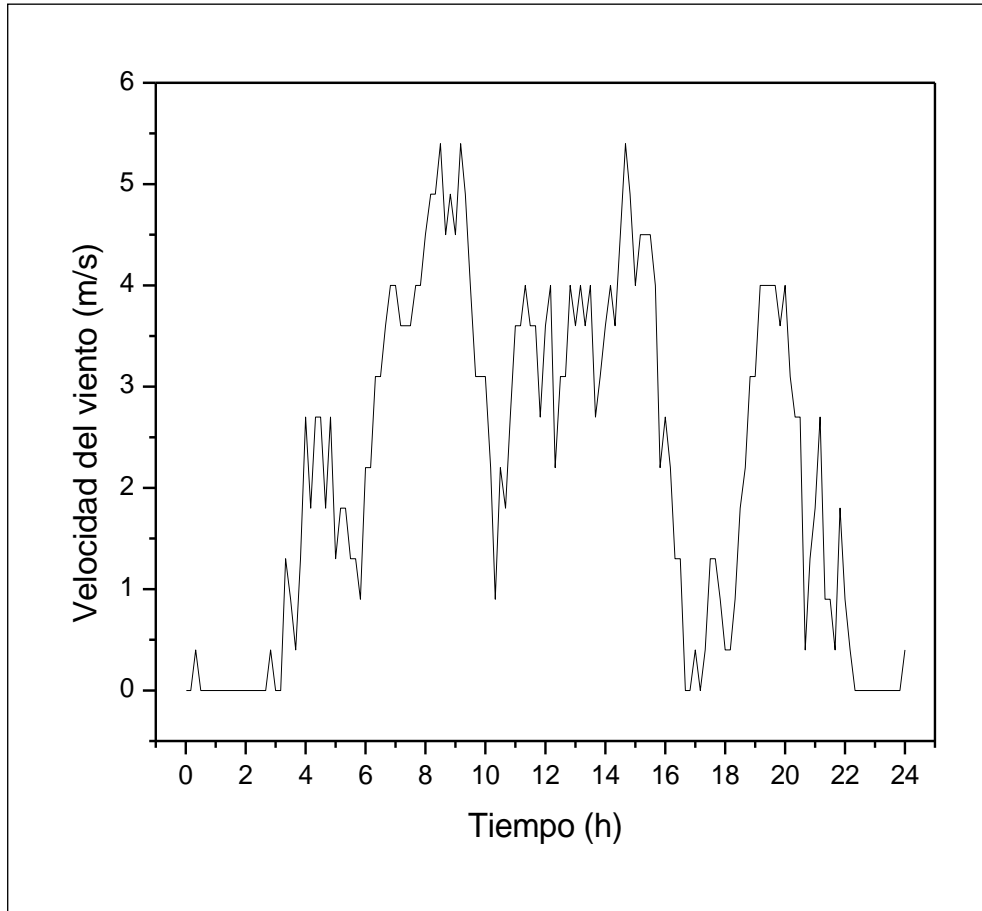


Figura 5.13. Variación de la velocidad del viento del 29 al 30 de enero de 2015.

5.2.3.2. Control de temperatura a 50 °C en la cámara de secado.

Las siguientes figuras muestran la evaluación del 27 al 28 de enero de 2015, la cual se realizó durante un período de 24 horas, iniciando a la 1 p.m.

Al igual que en la evaluación anterior se estableció una condición para mantener una temperatura estable de 50 °C en la cámara de secado, cuando la temperatura del agua fue mayor o igual a 55 °C se proporcionó calor a la cámara de secado con el agua caliente (sistema solar) y cuando la temperatura del agua fue menor a 55 °C se proporcionó calor a la cámara de secado con las resistencias eléctricas (sistema auxiliar) ,ya que con temperaturas del agua menores a 55 °C no se mantiene estable 50 °C en la cámara de secado.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

La figura 5.14, reporta el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. Como se observa la temperatura inicial en la cámara de secado fue de 46.3 °C la cual aumento rápidamente a 50 °C, durante las 2 primeras horas estuvo por encima de 52 °C llegando a 53 °C un grado más por encima del margen establecido debido a que las máximas temperaturas del agua estuvieron en un rango de 85 a 100 °C durante las primeras 5 horas como consecuencia de los altos niveles de radiación solar, posteriormente la temperatura en la cámara de secado se mantuvo en 50 °C con un margen de ± 2 °C. Se aprecia que la temperatura del agua fue menor a 55 °C de las 13 a las 20 horas durante el período sin y baja radiación solar, lo cual quiere decir que durante este tiempo se utilizó el sistema auxiliar (resistencias eléctricas) para mantener estable la temperatura en la cámara de secado. Mientras que la temperatura ambiente se mantuvo por debajo de 23.6 °C durante todo el período de la evaluación.

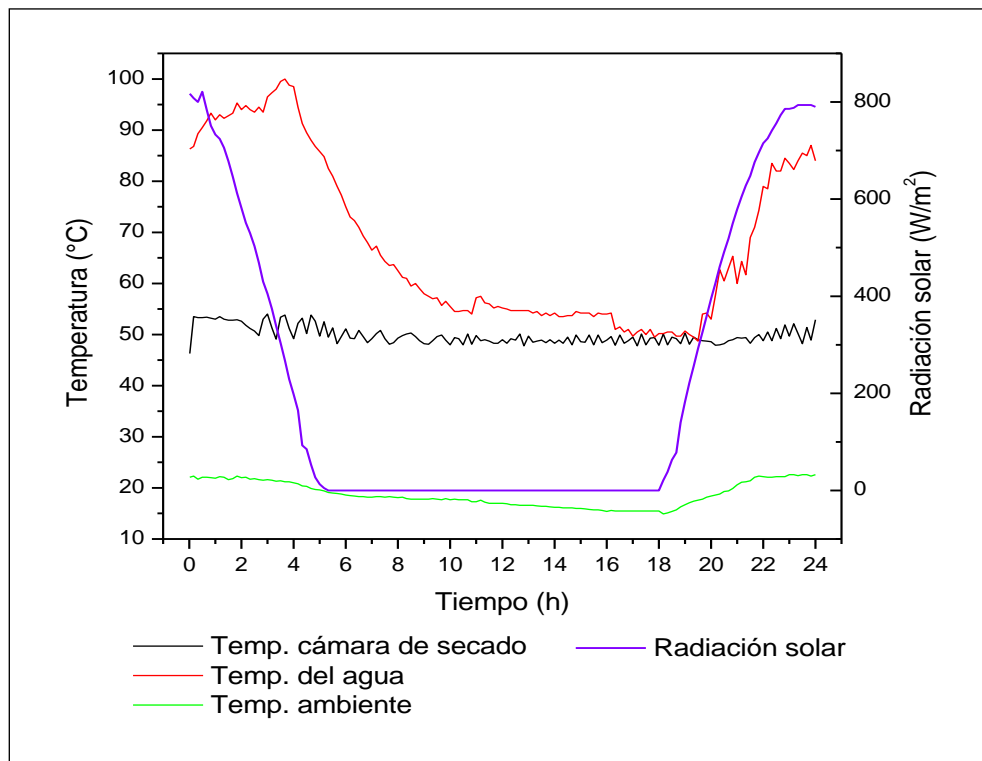


Figura 5.14. Control de la temperatura en la cámara de secado a 50 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

La figura 5.15, Presenta las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente del día 27 al 28 de enero de 2015. Como se observa, la humedad relativa inicial en la cámara de secado fue muy baja de 5.9 %, posteriormente descendió a 5 % manteniéndose así durante las 24 horas, mientras que la humedad relativa ambiente fue superior al 65 % casi durante todo el período de evaluación.

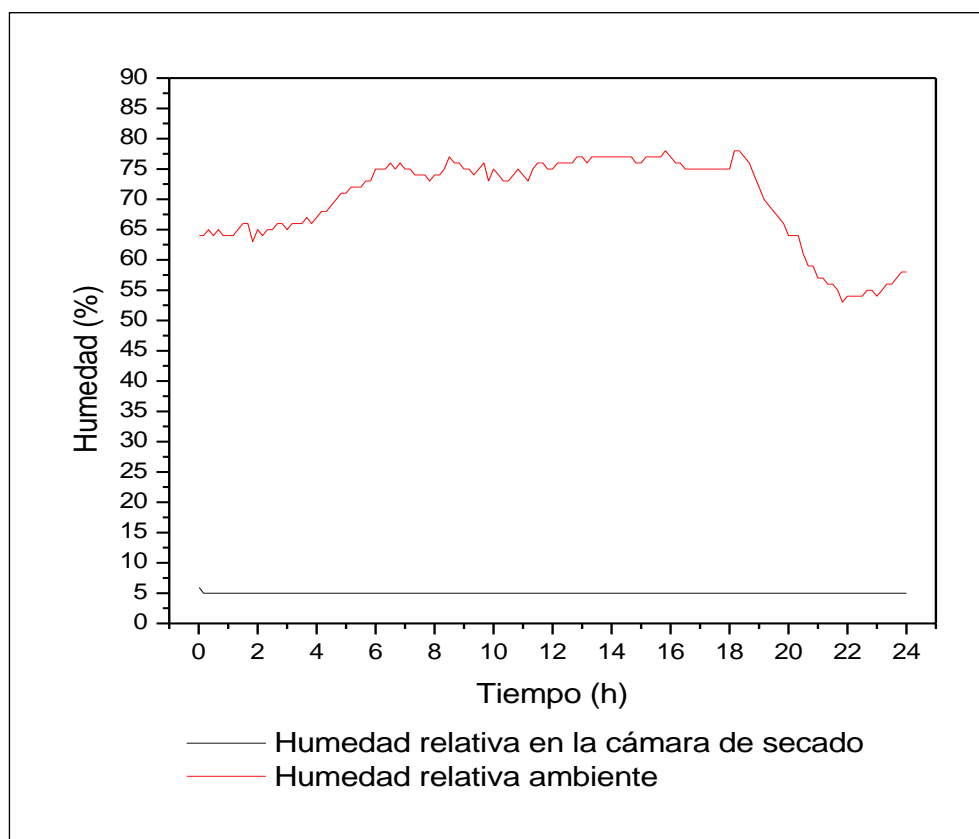


Figura 5.15. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 27 al 28 de enero de 2015.

La figura 5.16, muestra la variación de la velocidad del viento de los días en los que se realizó la prueba. Se observa que desde el inicio hasta la 5ª hora se tuvo una velocidad del viento entre 3.4 y 6.7 m/s posteriormente en un instante bajo la velocidad a 3 m/s, como se observa nuevamente se tuvieron velocidades de 3.4 a 7.6 m/s durante un Sistema híbrido termosolar-eólico para la conservación de productos agropecuarios. **82**

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

período de 9 horas y después se mantuvieron velocidades menores a 3.4 m/s. Teniendo un total de 14 horas de viento favorable para generar energía eléctrica.

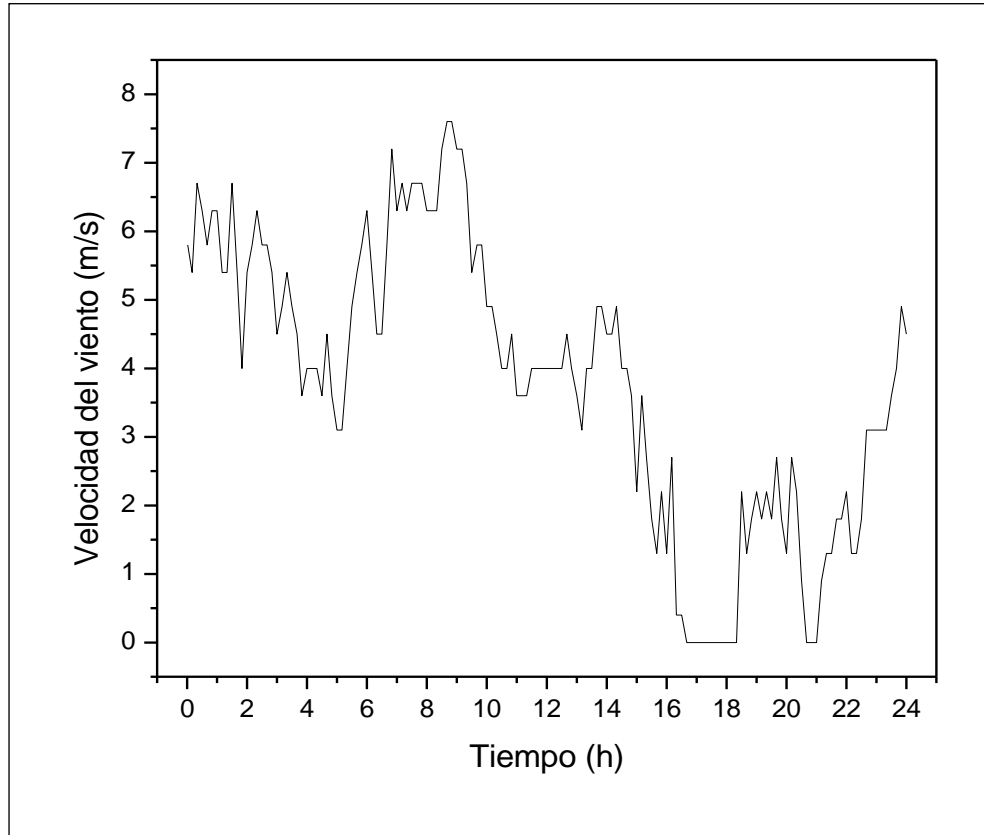


Figura 5.16. Variación de la velocidad del viento del 27 al 28 de enero de 2015.

5.2.3.3. Control de temperatura a 60 °C en la cámara de secado.

Las siguientes figuras muestran la evaluación del 8 al 9 de febrero de 2015, la cual se realizó durante un período de 24 horas, iniciando a la 9 a.m.

Para mantener una temperatura estable de 60 °C en la cámara de secado se estableció la siguiente condición, cuando la temperatura del agua sea mayor o igual a 69 °C se proporciona calor a la cámara de secado con el agua caliente (sistema solar) y cuando la temperatura del agua sea menor a 69 °C se proporciona calor a la cámara de secado con las resistencias eléctricas (sistema auxiliar), ya que con temperaturas del agua menores a 69 °C no se logra mantener estable 60 °C en la cámara de secado.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

En la figura 5.17, se representa el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. Como se observa la temperatura inicial en la cámara de secado era de 21 °C después de 30 minutos llegó a 60 °C manteniéndose esta temperatura con un rango de ± 2 °C durante toda la evaluación. Al igual que en los casos anteriores se aprecia la dependencia de la temperatura del agua con respecto a la radiación solar, debido a que se tuvo una radiación máxima entre 700 y 836 W/m^2 durante un largo período de tiempo partir de la 2^a a la 6^a hora (11:00 am a 3:00 p.m.), se tuvieron temperaturas máximas del agua entre 90 y 106 °C durante 7 horas, manteniéndose por encima de 69 °C desde el inicio hasta la hora 16 (1:00 am), a partir de esta hora hasta el final de la evaluación se utilizó el sistema auxiliar (resistencias eléctricas) para mantener estable 60 °C en la cámara de secado. La temperatura ambiente también fue alta se tuvo una máxima de 32.4 °C.

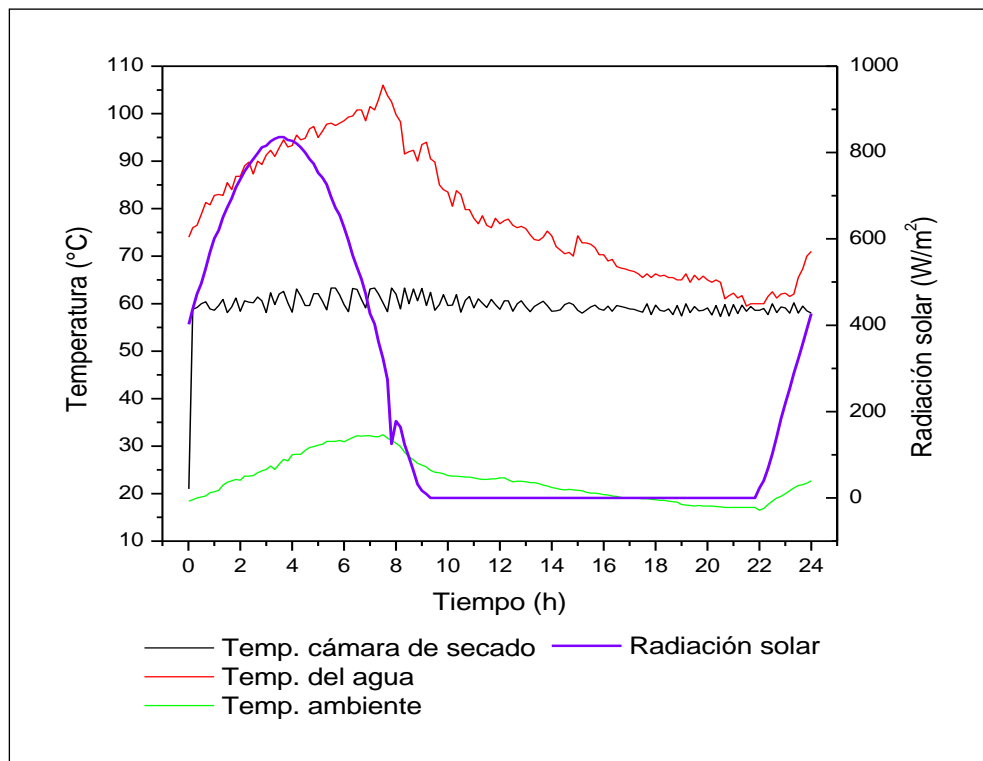


Figura 5.17. Control de la temperatura en la cámara de secado a 60 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

En la figura 5.18, se observa las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente. Como se aprecia la humedad relativa en la cámara de secado fue baja de 5 % y se mantuvo así durante las 24 horas. Mientras que la humedad relativa ambiente durante las horas de radiación solar descendió de 79 % hasta 31 %.

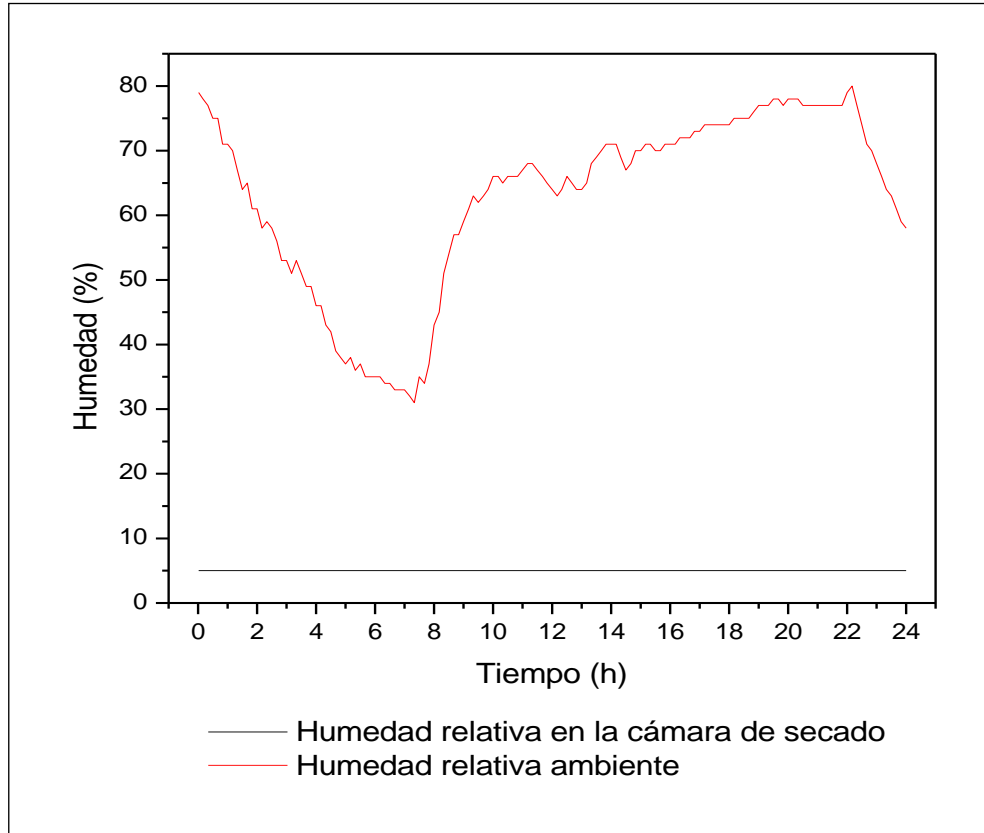


Figura 5.18. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 8 al 9 de febrero de 2015.

La figura 5.19, representa la variación de la velocidad del viento del día en el que se realizó la evaluación. Se observa que durante casi todo el período de evaluación la velocidad del viento fue casi nula, habiendo solamente un período de 3 horas con viento de 1.8 a 3.6 m/s, manteniéndose solo 40 minutos viento con velocidad de 3.6 m/s.

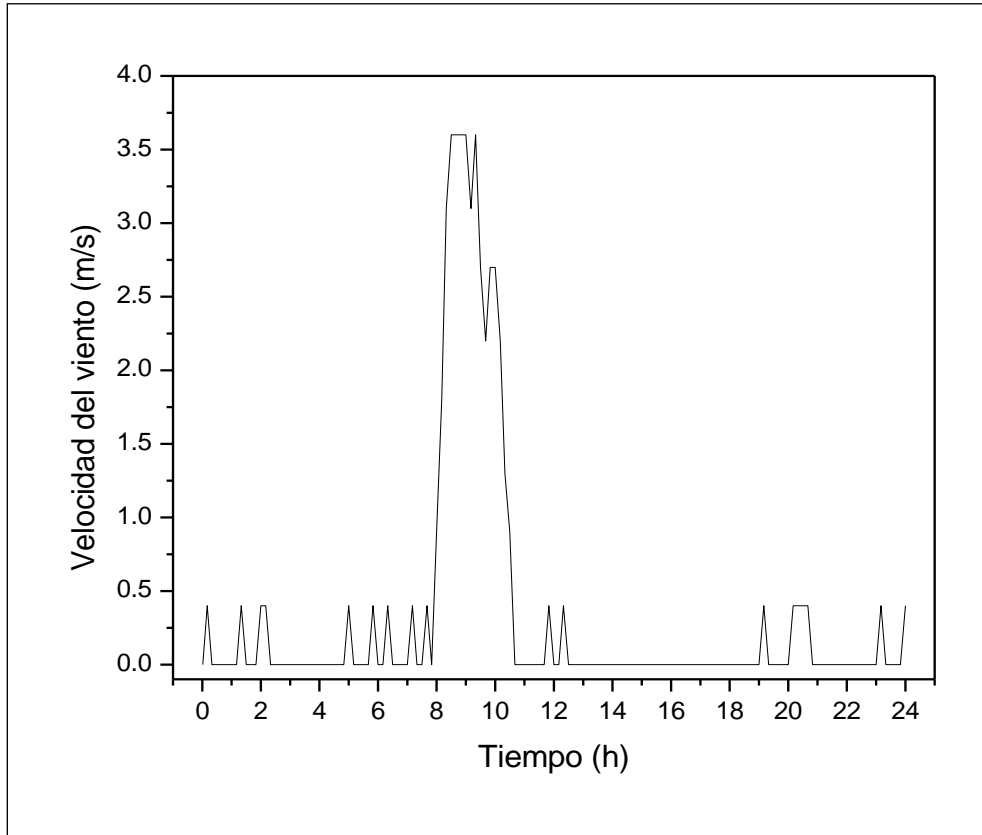


Figura 5.19. Variación de la velocidad del viento del 8 al 9 de febrero de 2015.

5.2.3.4. Control de temperatura a 70 °C en la cámara de secado.

En las siguientes figuras se reporta la evaluación del 12 al 13 de febrero de 2015, la cual se realizó durante un período de 24 horas, iniciando a la 11 a.m.

La condición que se estableció para mantener una temperatura estable de 70 °C en la cámara de secado, quedó de la siguiente manera: cuando la temperatura del agua fue mayor o igual a 79 °C se proporcionó calor a la cámara de secado con el agua caliente (sistema solar) y cuando la temperatura del agua fue menor a 79 °C se proporcionó calor a la cámara de secado con las resistencias eléctricas (sistema auxiliar), ya que con temperaturas del agua menores a 79 °C no se mantiene estable 70 °C en la cámara de secado.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

La figura 5.20, muestra el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. La temperatura inicial en la cámara de secado fue de 20.1 °C, la cual después de 40 minutos llegó a 70 °C manteniéndose así con un margen de 0 a -2 °C (de 68 a 70 °C) durante toda la evaluación. Como se observa la radiación solar máxima estuvo entre 700 y 818 W/m² durante las primeras 3 horas, teniendo temperaturas máximas del agua entre 80 y 89 °C, manteniéndose por encima de 79 °C casi desde el inicio hasta la 7^a hora (6:00 p.m.), a partir de esta hora hasta la 22^a hora se tuvieron temperaturas del agua menores a 79 °C utilizando el sistema auxiliar para mantener 70 °C en la cámara de secado. La temperatura ambiente se mantuvo por debajo de 26 °C durante todo el período de la evaluación.

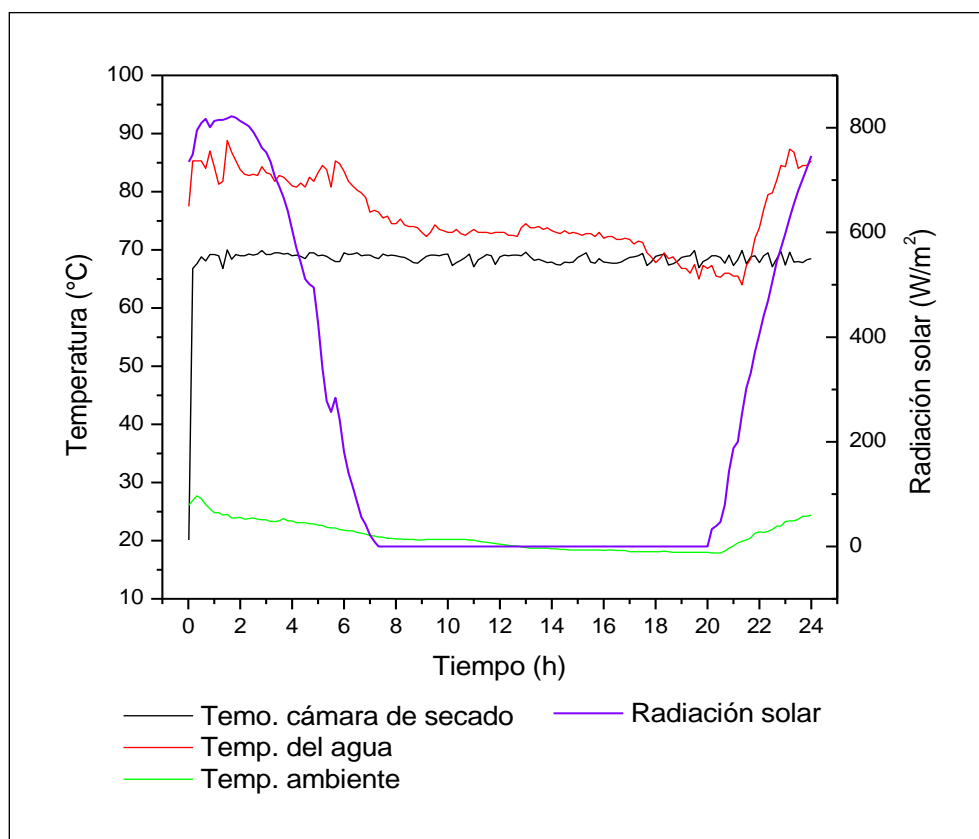


Figura 5.20. Control de la temperatura en la cámara de secado a 70 °C y variación de la temperatura del agua y ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

En la figura 5.21, se observa las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y la humedad relativa ambiente. A l igual que en el caso anterior la humedad relativa en la cámara de secado fue baja de 5 % y se mantuvo así durante las 24 horas. Mientras que la humedad relativa ambiente estuvo entre 50 y 80 %.

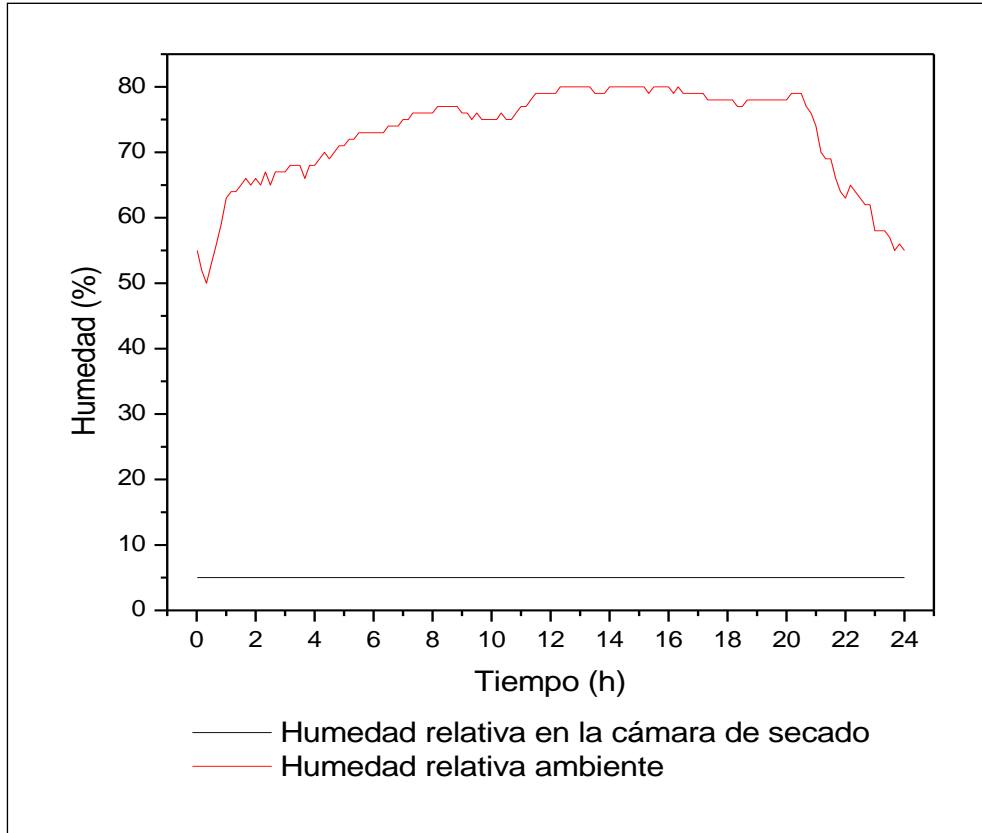


Figura 5.21. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente del 12 al 13 de febrero de 2015.

La figura 5.22, representa la variación de la velocidad del viento. Como se observa durante la evaluación hubo viento con velocidades superiores a 3.4 m/s, teniendo un viento con velocidad máxima de 6.7m/s. En total se tuvo 13 horas con viento entre 3.4 a 6.7 m/s favorable para la generación de energía eléctrica.

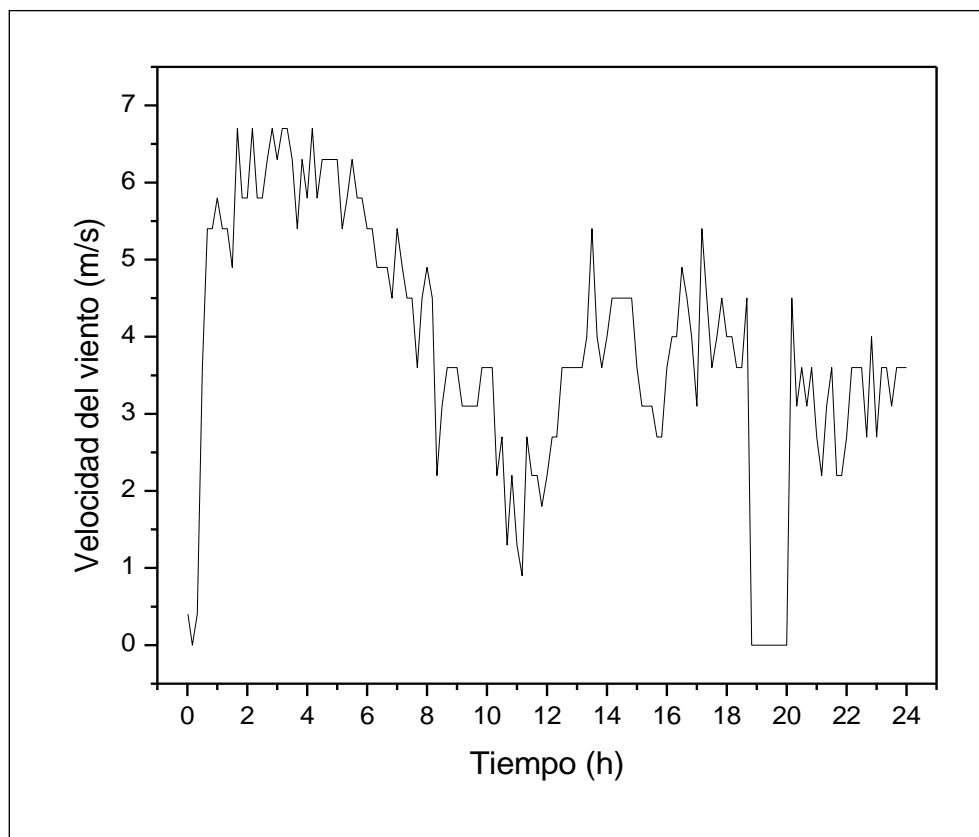


Figura 5.22. Variación de la velocidad del viento del 12 al 13 de febrero de 2015.

5.3. Evaluación con producto (deshidratación de manzana).

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de la disminución del contenido de humedad en la manzana durante el proceso de secado a diferentes temperaturas de 50, 60 y 70 °C.

Para esta evaluación se utilizó manzana, con un contenido de humedad inicial alrededor del 89 %, el cual se determinó mediante el método de determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico según la Norma oficial mexicana NOM-116-SSA1-1994. Las muestras presentaron un contenido de humedad final de 16.03 %, 15.34 % y 14.28 % para las muestras deshidratadas a 50, 60 y 70 °C respectivamente.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

El período de pruebas se realizó del 19 al 21 de febrero de 2015, la metodología que se siguió para la deshidratación fue la siguiente: 1) clasificación y selección, 2) lavado y secado, 3) rebanado, 4) inmersión para acondicionamiento en ácido cítrico, 5) Escurrido, 6) llenado de bandejas, 7) deshidratado, 8) atemperado, 9) almacenado.

La determinación de humedad inicial y final así como la metodología para la deshidratación se presenta en el anexo.

En la figura 5.23, se observa las variaciones de humedad en las muestras deshidratadas a 50, 60 y 70 °C. Cada una de estas evaluaciones representa las curvas de secado dentro del dominio de humedad contenida en las muestras de manzana. Se puede apreciar la influencia de la temperatura en la cámara de secado sobre el proceso de secado ya que al aumentar la temperatura disminuye significativamente el tiempo de secado, el proceso de secado que ocurre a 60 y 70 °C necesita menos tiempo que para el proceso que se efectúa a 50 °C. También se observa que para las muestras deshidratadas a 60 y 70 °C el proceso transcurre dentro del período de velocidad decreciente, mientras que para las muestras deshidratadas a 50 °C se tienen dos períodos de secado de velocidad constante y decreciente.

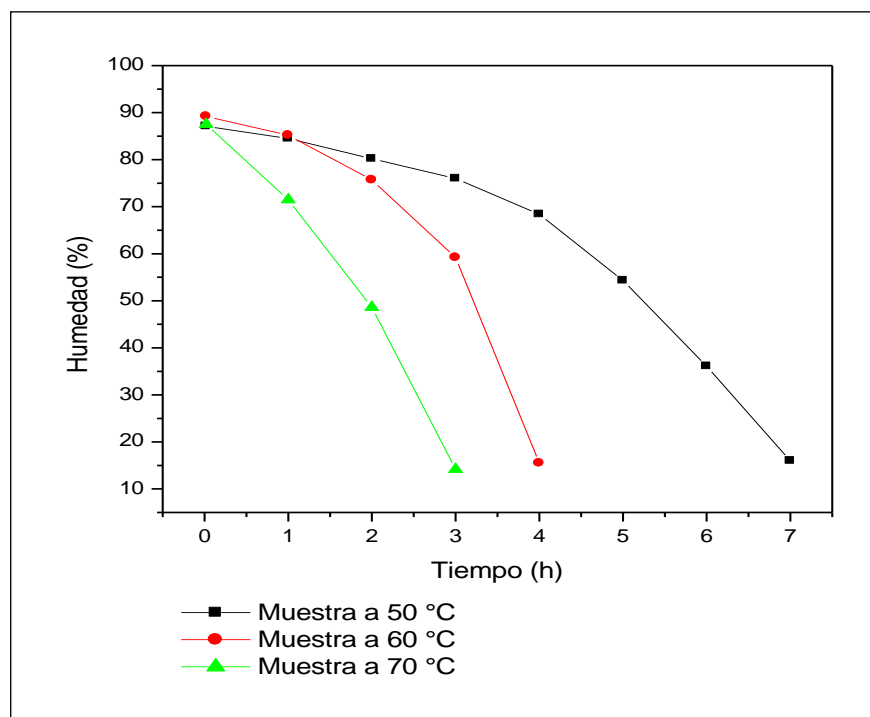


Figura 5.23. Variación de la humedad en las muestras de manzana en el tiempo a tres temperaturas.

Parámetros de operación del secador híbrido termosolar-eólico y parámetros ambientales durante las pruebas de deshidratado a 50 °C.

La figura 5.24, muestra el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. La prueba inició a las 10:00 a.m., con una temperatura inicial del agua de 75 °C, alcanzando un valor máximo entre 76 y 77.5 °C, a partir de la 3^a a la 4^a hora. La temperatura inicial en la cámara de secado fue de 32.5 °C, aumentando rápidamente hasta alcanzar la condición establecida de 50 °C, manteniéndose entre 48 y 50 °C durante toda la prueba. La radiación solar máxima fue de 959 W/m² a la 2^a hora (1:00 pm).

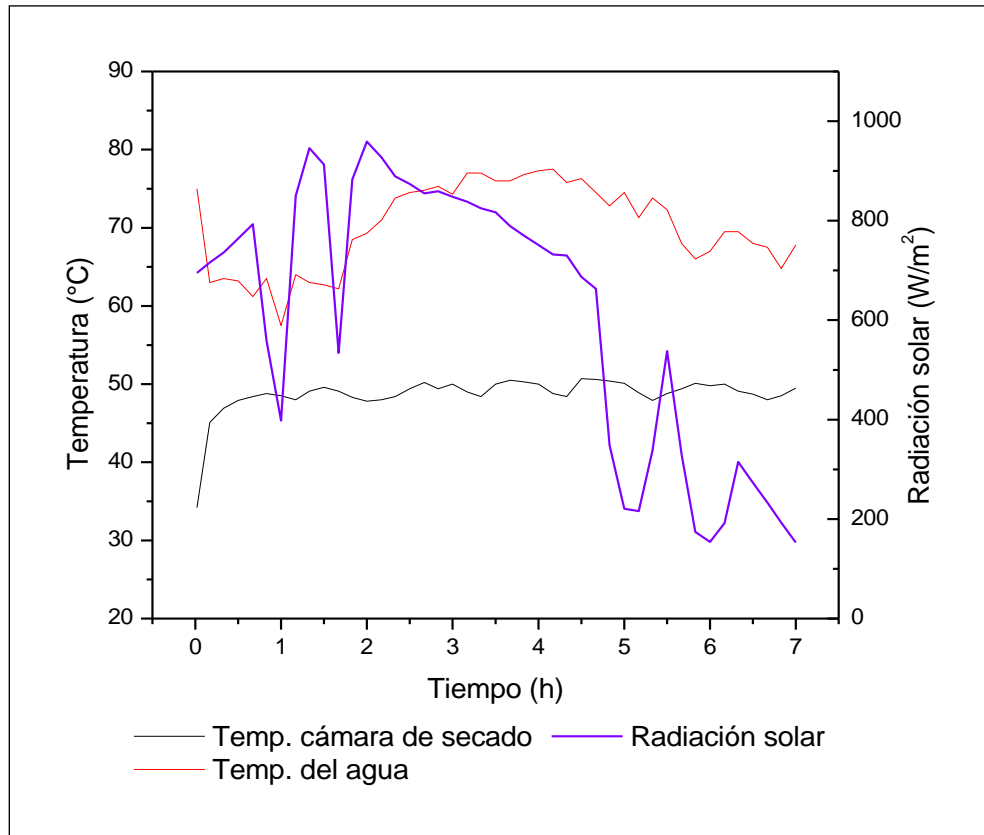


Figura 5.24. Control de la temperatura a 50 °C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

En la figura 5.25, se reporta las variaciones de la humedad relativa en la cámara y humedad relativa ambiente de los días en que se realizó la prueba. Para este día de prueba, la humedad relativa ambiente se mantuvo entre 56 y 78 %. Mientras que la humedad relativa inicial en la cámara de secado estuvo entre 17 y 21 %, disminuyendo hasta 6 % en un lapso de 1 hora, posteriormente se observa un incremento al 15 % y se mantuvo entre 15 y 5 % hasta el final.

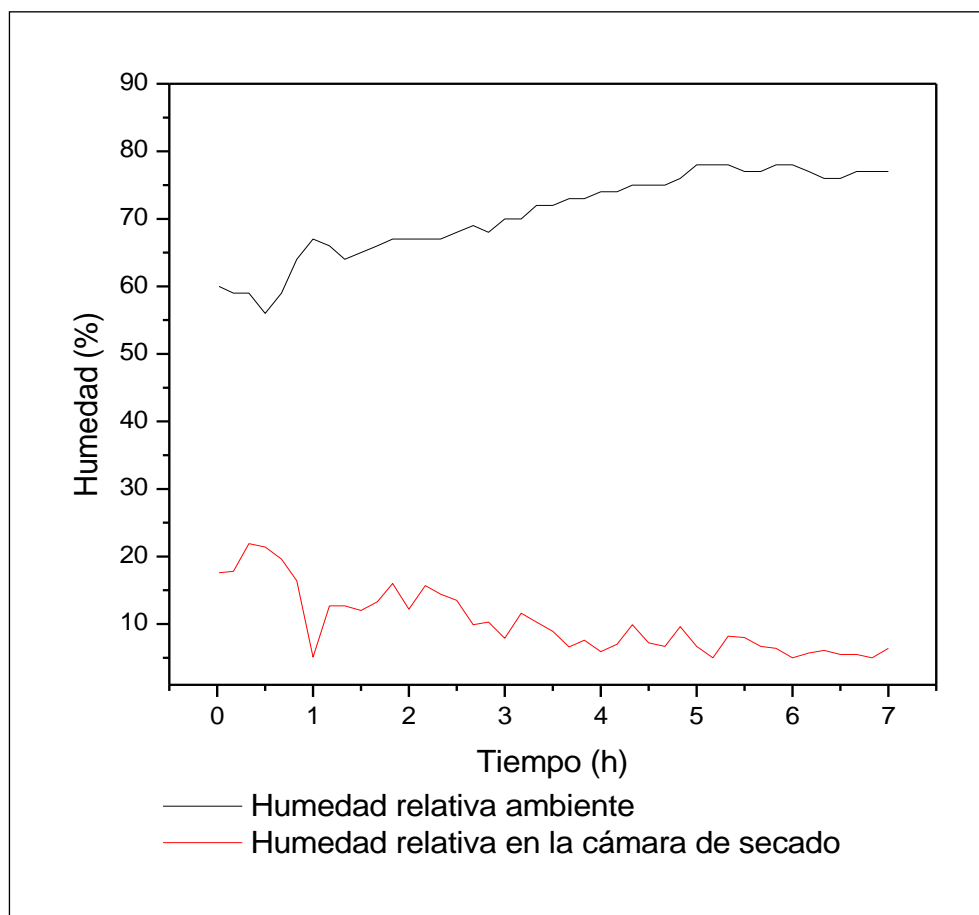


Figura 5.25. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 50 °C.

Parámetros de operación del secador híbrido termosolar-eólico y parámetros ambientales durante las pruebas de deshidratado a 60 °C.

En la figura 5.26, se representa el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. La evaluación inició a las 11:00 a.m., con una temperatura inicial del agua de 67.8 °C, alcanzando un valor máximo entre 79 y 83 °C, con una radiación solar entre 803 y 851 W/m² durante 1 hora. La temperatura en la cámara de secado se mantuvo entre 58 y 60 °C durante toda la evaluación.

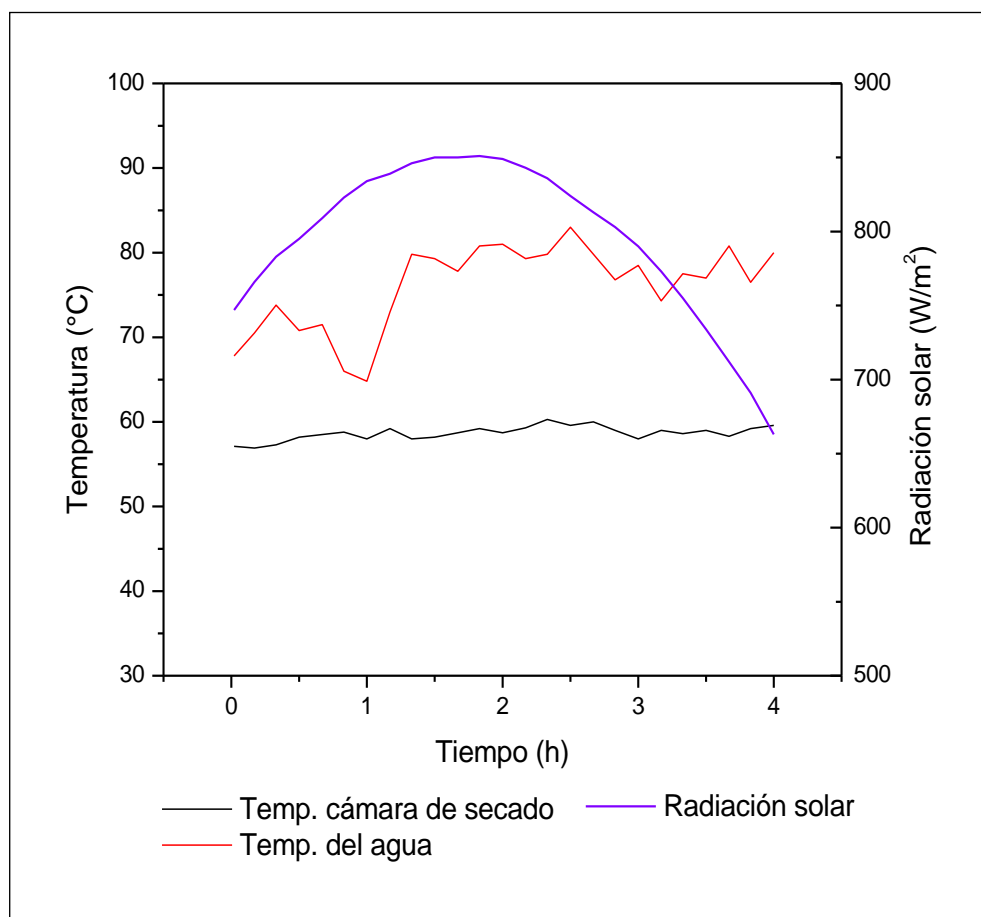


Figura 5.26. Control de la temperatura a 60 °C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

La figura 5.27, muestra las variaciones de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente. Como se observa, la humedad relativa en la cámara se mantuvo entre 15.4 y 6 % durante la primera hora, descendiendo hasta 5 % para mantenerse así hasta el final de la evaluación. Mientras que la humedad relativa ambiente estuvo entre 58 y 41 %.

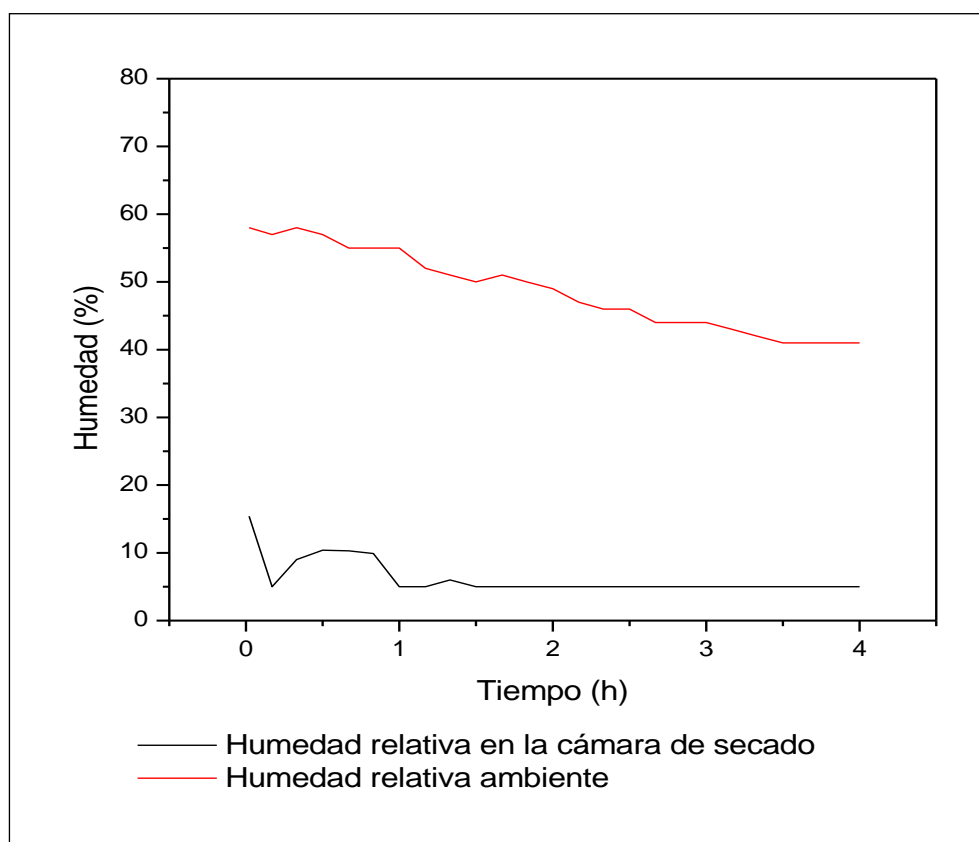


Figura 5.27. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 60 °C.

Parámetros de operación del secador híbrido termosolar-eólico y parámetros ambientales durante las pruebas de deshidratado a 70 °C.

En la figura 5.28, se presenta el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado y la variación de la temperatura del agua caliente y temperatura ambiente. La prueba se realizó de 11:00 a.m. a 2:00 p.m., tiempo durante el cual la temperatura del agua se mantuvo entre 75.8 y 90.8 °C, con una radiación solar entre 852 y 752 W/m². Se puede apreciar que la temperatura en la cámara de secado se mantuvo entre 68 y 70 °C desde el inicio hasta el final.

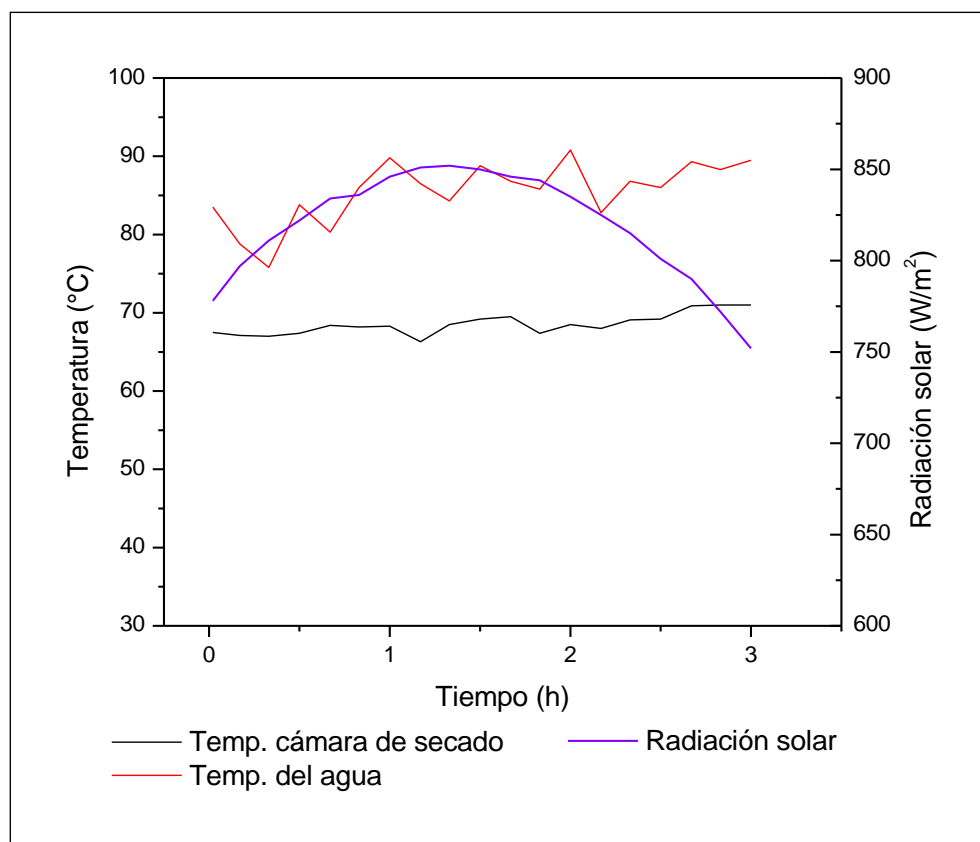


Figura 5.28. Control de la temperatura a 70 °C en la cámara de secado y variación de la temperatura ambiente en función de la radiación solar.

Capítulo 5. Resultados y discusiones.

En la figura 5.29, se representa las variaciones de la humedad relativa en la cámara y humedad relativa ambiente de los días en que se realizó la prueba. Como se observa la humedad relativa ambiente se mantuvo entre 51 y 38 %. Mientras que la humedad relativa inicial en la cámara de secado fue de 5 %, aumentando rápidamente a 10.3 para mantenerse entre 10.3 y 8.5 % durante 1 hora, posteriormente disminuyó a 5 % manteniéndose hasta el final.

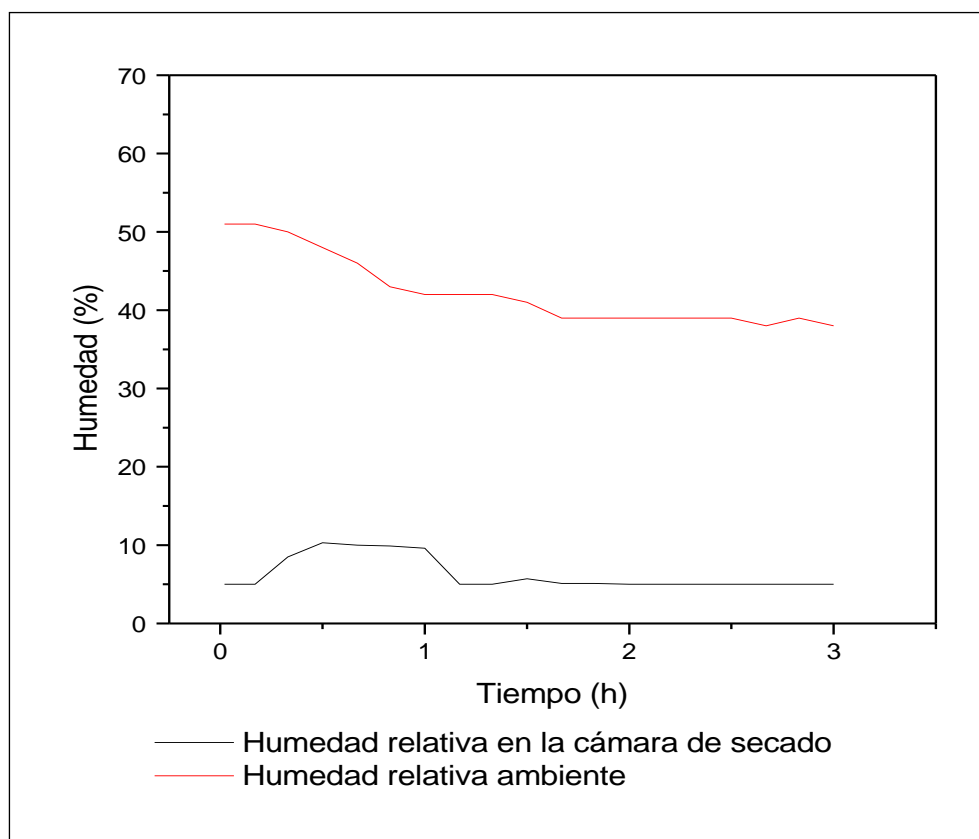


Figura 5.29. Variación de la humedad relativa en la cámara de secado y humedad relativa ambiente durante el proceso de deshidratado de manzana a 70 °C.

5.5. Eficiencia del secador híbrido termosolar-eólico.

La figura 5.30, presenta la eficiencia térmica diaria del secador híbrido termosolar-eólico a diferentes temperaturas en la cámara de secado. Se puede observar que al aumentar la temperatura en la cámara de secado la eficiencia es menor, ya que se necesita más energía para tener una temperatura mayor en la cámara.

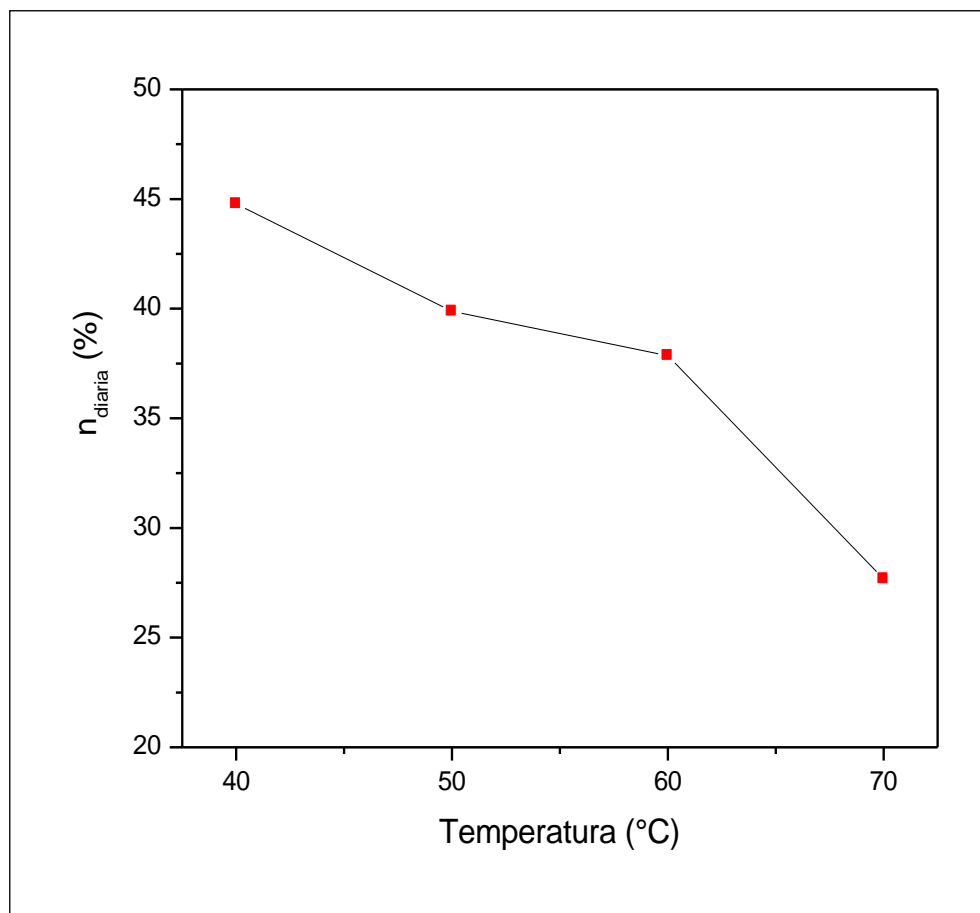


Figura 5.30. Eficiencia térmica diaria del secador híbrido termosolar-eólico para diferentes temperaturas en la cámara de secado.

Conclusiones

- a) Se realizó el diseño y construcción del sistema híbrido termosolar–eólico para la conservación de productos agropecuarios con base al potencial energético disponible y necesidades energéticas, obteniendo un sistema integrado principalmente por dos colectores solares de tubos de vacío (heat pipe), un termotanque de almacenamiento de agua, un aerogenerador whisper de 900 W y un sistema de medición y control. La cámara de secado mide 2 m de largo, 1 m de ancho y alto.
- b) Se realizó la implementación de un aerogenerador como fuente de energía auxiliar el cual permite el funcionamiento del ventilador, bomba, extractor, resistencias y sistema de medición y control en todo momento.
- c) Se desarrolló un sistema de medición y control que permite controlar y establecer diferentes temperaturas en la cámara de secado, logrando mantener estable temperaturas de 40, 50, 60 y 70 °C durante 24 horas aun en días de baja radiación solar.
- d) La eficiencia térmica del sistema depende de la temperatura en la cámara de secado, por lo cual se determinó dependiendo de la temperatura controlada en la cámara obteniendo una eficiencia de 44.78, 39.88, 37.86 y 27.68 % para 40, 50, 60 y 70 °C respectivamente.
- e) Se realizó la evaluación en vacío del sistema con el sistema solar y con del sistema auxiliar eólico por separado, logrando temperaturas máximas en la cámara de secado entre 61 y 76.5 °C en días con radiación máxima entre 600 y 791 W/m² y temperaturas máximas de 77.1 °C en la cámara con el sistema auxiliar.
- f) Se realizó la evaluación del sistema con carga, deshidratando manzana a diferentes temperaturas controladas, para la cual los tiempos de secado fueron de 7 horas para 50 °C y 4 para 60 °C y 3 horas para 70 °C. Llevando en este período de tiempo la humedad inicial de 89 % hasta una humedad final de 16.03

Conclusiones

%, 15.34 % y 14.28 % para las muestras deshidratadas a 50, 60 y 70 °C, respectivamente.

Trabajos a futuro.

- 1.- Mejorar el funcionamiento del sistema de medición y control, con la finalidad de controlar de manera más eficiente los parámetros de secado.
- 2.- Optimizar el funcionamiento del sistema, para establecer condiciones más exactas para mantener estable la temperatura en la cámara de secado.
- 2.- Analizar la cinética de secado de diversos productos agropecuarios y determinar la eficiencia de secado.
- 4.-Acoplar un sistema de medición de la pérdida de masa del producto, para determinar el tiempo de secado sin interrumpir el proceso.

Anexos

Fotos del sistema híbrido termosolar eólico para la conservación de productos agropecuarios.



Figura A1. Imagen de la vista frontal del sistema híbrido termosolar eólico.



Figura A2. Imagen de la Vista trasera del sistema híbrido termosolar eólico.



Figura A3. Imagen de la vista lateral derecha del sistema híbrido termosolar eólico.



Figura A4. Imagen de la Vista lateral izquierda del sistema híbrido termosolar eólico.

Determinación del contenido de humedad inicial de la manzana.

Método de determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico según la Norma oficial mexicana NOM-116-SSA1-1994.

Aparatos

Balanza analítica con $\pm 0,1$ mg de sensibilidad.

Estufa con termostato para mantener una temperatura de 100 °C

Procedimiento

- 1.- Se tomaron 2 bandejas de aluminio y se pesaron (masa M1a, M1b).
- 2.- Se colocó una muestra de manzana inferior a 10 g en cada bandeja y se pesó (masa M2a, M2b).
- 3.- Se introdujeron en la estufa las bandejas con la muestra, se cerró la estufa y se secó durante 4 horas a 100 °C.
- 4.- Trascurridas las 4 horas se abrió la estufa, dejándose enfriar las muestras hasta temperatura ambiente.
- 5.- Se pesaron las muestras inmediatamente (masa M3a, M3b)
- 6.- Se determinó el contenido de humedad de las muestras con la fórmula A1.

Resultados

Las bandejas con las muestras se introdujeron a la estufa a las 10:00 am, con el siguiente peso:

Bandeja 1 (M1a)= 0.7172 g

Muestra 1= 2.5 g

Bandeja 1 con muestra 1 (M2a)= 3.2172 g

Bandeja 2 (M1b)= 0.8022 g

Muestra 2= 2.13 g

Bandeja 2 con muestra 2 (M2b)= 2.9322 g

Anexos

Después de transcurrir las 4 horas, a las 2:00 p.m. se sacaron las bandejas con las muestras y se pesaron dando los siguientes pesos:

Bandeja 1 con muestra 1 deshidratada (M3a)= 0.9869 g

Bandeja 2 con muestra 2 deshidratada (M3b)= 1.0304 g

El contenido de humedad en las muestras se calculó con la siguiente fórmula expresada en por ciento:

$$\text{Humedad \%} = \frac{M2-M3}{M2-M1} X 100 \quad (A1)$$

En donde:

M1 = Peso de la bandeja (g)

M2 = Peso de la bandeja más muestra húmeda (g)

M3 = Peso de la bandeja más muestra seca (g)

Dando los siguientes porcentajes de humedad para cada muestra:

$$\text{Humedad \%} = \frac{3.2172 \text{ g} - 0.9869 \text{ g}}{3.2172 \text{ g} - 0.7172 \text{ g}} X 100 = 89.2 \%$$

$$\text{Humedad \%} = \frac{2.9322 \text{ g} - 1.0304 \text{ g}}{2.9322 \text{ g} - 0.8022 \text{ g}} X 100 = 89.2 \%$$

Metodología para la deshidratación de manzana.

La metodología que se siguió para la deshidratación de manzana fue la siguiente:

1) Clasificación y selección

Se eligieron manzanas libres de daños provocados por insectos o golpes y de un tamaño uniforme.



Figura A5. Clasificación y selección de la manzana.

2) Lavado y secado

Se lavaron y se depositaron sobre papel para facilitar su secado.

3) Rebanado

Se rebana en rodajas manteniendo un grosor uniforme de 5 mm aproximadamente.

4) Inmersión para acondicionamiento en ácido cítrico

Para que la manzana deshidratada mantenga sus características de color y textura, es decir que no se sienta correosa, y se conserve más tiempo, se le dio un tratamiento de acondicionamiento previo a la deshidratación, para lo cual se introdujo en un baño de ácido cítrico (6 g por litro de agua, durante 5 minutos) para impedir el oscurecimiento enzimático.



Figura A6. Inmersión de la manzana para acondicionamiento en ácido cítrico.

5) Ecurrido

Transcurrido el tiempo de acondicionamiento (inmersión), se sacaron las rebanadas de manzana y se colocaron en un escurridor de plástico para eliminar la mayor cantidad de agua.



Figura A7. Ecurrido de manzana.

6) Llenado de bandejas

Una vez que se ha eliminado el exceso de agua, se pesó la manzana para llevar un control de la pérdida de peso y se colocó sobre las bandejas del secador, cuidando que las rebanadas no queden empalmadas.



Figura A8. Llenado de bandejas para la deshidratación de manzana.

7) Deshidratado

Se introdujeron las bandejas con la manzana al secador solar para su deshidratación con las condiciones establecidas.



Figura A9. Deshidratación de manzana.

Se reconoce que ha terminado el secado de la fruta cuando este elástica y se pueda doblar sin que se rompa y no se observen bolsas de humedad.

8) Atemperado

Una vez concluida la deshidratación se dejó enfriar durante 30 minutos para que se equilibre a las condiciones ambientales.

Después del tiempo de atemperamiento, la manzana se retiró de las bandejas y se pesó para llevar un control de la pérdida de peso y determinación del contenido final de humedad.

9) Empacado

Finalmente se empaco la manzana deshidratada en bolsas cerradas para evitar una posible contaminación

Determinación del contenido de humedad final de la manzana.

Para la determinación de la humedad final de la manzana deshidratada, se tomaron 3 muestras una para cada evaluación a diferente temperatura de 50, 60, y 70 °C establecidas en la cámara de secado, para llevar un control de la pérdida de peso.

A continuación se presenta una tabla con el peso de cada muestra antes y después de su deshidratación en el secador híbrido termosolar-eólico.

Tabla A1. Peso de las muestras antes y después de su deshidratado en el secador híbrido termosolar-eólico.

DESHIDRATADO A 50 °C	
Peso (g)	Muestra 1
Inicial	8.56
Final	1.31
DESHIDRATADO A 60 °C	
Peso (g)	Muestra 2
Inicial	11.66
Final	1.48
DESHIDRATADO A 70 °C	
Peso (g)	Muestra 3
Inicial	10.63
Final	1.54

Después del deshidratado se tomaron las muestras y se determinó su contenido de humedad final mediante el mismo método con el cual se determinó el contenido de humedad inicial de la manzana, sometiéndolas a un proceso controlado de deshidratación a 100 °C en la estufa con termostato durante 4 horas para extraerles la humedad que aún tenían.

En la siguiente tabla se muestra el peso de las muestras antes y después de someterlas a un proceso controlado de deshidratación a 100 °C.

Tabla A2. Peso de las muestras antes y después de su deshidratación a temperatura controlada de 100°C.

DESHIDRATADO A 100 °C EN LA ESTUFA			
Muestras deshidratadas a 50 °C			
Peso (g)	Muestra 1	Bandeja 1	Bandeja 1 con muestra 1
Inicial	1.31	0.81	2.12
Final	1.1	0.81	1.91
Muestras deshidratadas a 60 °C			
Peso (g)	Muestra 2	Bandeja 2	Bandeja 2 con muestra 2
Inicial	1.48	0.73	2.21
Final	1.25	0.73	1.98
Muestras deshidratadas a 70 °C			
Peso (g)	Muestra 3	Bandeja 3	Bandeja 3 con muestra 3
Inicial	1.54	0.84	2.38
Final	1.32	0.84	2.16

El contenido de humedad en las muestras se calculó con la siguiente fórmula expresada en por ciento:

$$\text{Humedad \%} = \frac{M2-M3}{M2-M1} \times 100 \quad (A1)$$

En donde:

M1 = Peso de la bandeja (g)

M2 = Peso de la bandeja más muestra húmeda (g)

M3 = Peso de la bandeja más muestra seca (g)

Contenido de humedad final de la muestra deshidratada a 50 °C

Muestra 1.

$$\text{Humedad \%} = \frac{2.12 \text{ g} - 1.91 \text{ g}}{2.12 \text{ g} - 0.81 \text{ g}} \times 100 = 16.03 \%$$

Anexos

Contenido de humedad final de la muestra deshidratada a 60 °C

Muestra 2.

$$\text{Humedad \%} = \frac{2.21 \text{ g} - 1.98 \text{ g}}{2.21 \text{ g} - 0.73 \text{ g}} \times 100 = 15.54 \%$$

Contenido de humedad final de la muestra deshidratada a 70 °C

Muestra 3

$$\text{Humedad \%} = \frac{2.38 \text{ g} - 2.16 \text{ g}}{2.38 \text{ g} - 0.84 \text{ g}} \times 100 = 14.28 \%$$

Bibliografía

[1] IILSEN, 2014, "Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México (análisis y propuesta), pag.9.

http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf

[2] Smith G.J.F. (2007), "Modelling of airflow through a stack in a timber. Drying kild. Applied Mathematical modelling.31 (1), 270-282.

[3] Hua L. (2001). Modelling of airflow in Woods kilns. Forest product journal.51 (1), 74-81.

[4] Ignacio Caballero F., "Diseño de un secador híbrido para madera aserrada", Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca México, 2008.

[5] Haque M. Nawshadul (2006), "performance of an Industrial Solar Kiln for Drying Timber", Department of chemical Engineering University of Sydney, NSW 2006, Australia.

[6] Solar Dryers Australia Pty Ltd (2007), Secador híbrido. Obtenida el 07 de diciembre de 2013, [http:// www.rosegum.com.au/10m.htm](http://www.rosegum.com.au/10m.htm).

[7] Gama Pérez J. David," Análisis teórico-experimental de un deshidratador solar combinado (Térmico-fotovoltaico), para el tratamiento de arroz", México, 2007.

[8] Durán G., Condorí M., Echazú R.,Díaz G.," Secador solar híbrido para la producción continua a escala industrial de pimienta para pimentón", INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. Universidad Nacional de Salta, U.N.Sa. Argentina, 2010.

[9] Deolarte Martínez C. Gerardo, "Secador solar híbrido para deshidratar productos agropecuarios", Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2008.

[10] Montero Puertas I.," Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos", Universidad de Extremadura, Badajoz España, 2005.

[11] Hermosillo J., Gudiño A., Mendoza R.; Notas Sobre el Curso de Energía Solar; Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, División Ingeniería. ITESO; Jalisco, México 1995.

Bibliografía

- [12] 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.
- [13] G.L. Visavale and Ching Lik Hii, Sachin Vinayak Jangam, Sze Pheng Ong and Arun Sadashiv Mujumdar . Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations. (2012). pag. 22-176.
- [14] Hernández Santana Alejandro. Deshidratador solar para productos agrícolas. Instituto de ciencias e investigación en ciencias agrícolas. 2010.
- [15] Solís Gutiérrez Ana Paola. Tecnologías para procesar alimentos con energía solar. Universidad de Zaragoza, España 2005.
- [16] 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.
- [17] Ibáñez Plana M. Rosell, J.R. Rosell Urruta Polo. Tecnología solar (colección energías renovables). J. Ediciones Mundi-Prenta.
- [18] Placco Cora, Saravia Luis, Cadena Carlos. Colectores solares para agua caliente. INENCO, UNSa –CONICET.
- [19] Hernández Goana Freddy. Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán. México 2010.
- [20] Velázquez Chávez Sandra Laura. Diseño de un microaerogenerador de eje vertical. Universidad Nacional Autónoma de México. México 2010.
- [21] CONAGUA. Normales climatológicas 1981-2000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Comisión Nacional del Agua.
- [22] S.K. Tyagi^a, V.V. Tyagi^b, S. Anand^a, V.Chandra^a, and R.C. Diwedi^a, (2009) "First and second law analyses of a typical solar air dryer system: a case study", ^aCollage of Engennering Shri Mata Vaishno Devi University, Katra 182320, Jammu and Kashmir, India; ^bSolar Energy Centre Ministry of New of Renewable Energy (MNRE) Gwal Pahari. Gurgaon 122002, India.