



**PLANTA COMUNITARIA PARA EL SECADO DE PRODUCTOS PESQUEROS OPERADA CON
ENERGÍA TERMOSOLAR PARA SU INTEGRACIÓN EN COMUNIDADES RURALES**

PRIMERA ETAPA

**DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO, INSTRUMENTACIÓN Y BALANCE ENERGÉTICO
DEL PROTOTIPO DE UN SECADOR SOLAR TIPO TÚNEL**

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	2
CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR PARA DESHIDRATADO DE PRODUCTOS PESQUEROS.....	2
<i>DESCRIPCIÓN DEL SECADOR SOLAR PARA EL DESHIDRATADO DE PRODUCTOS PESQUEROS.....</i>	<i>2</i>
<i>SUBSISTEMAS AUXILIARES DEL SECADOR SOLAR.....</i>	<i>3</i>
DIMENSIONADO Y DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-AGUA.....	6
DIMENSIONADO Y DISEÑO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA DESHIDRATADOR SOLAR.....	8
EVALUACIÓN TÉRMICA DEL DESHIDRATADOR SOLAR SIN PRODUCTO.	9
DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR.....	12
RELACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA TEMPERATURA Y VELOCIDAD DEL SECADOR.....	15
CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE UN INSTRUMENTO DE MONITOREO DE DATOS	19
<i>RESULTADOS</i>	<i>22</i>
CONCLUSIONES RESPECTO A LA INSTRUMENTACIÓN	25
CONCLUSIONES	26
ANEXO DE ILUSTRACIONES Y TABLAS.....	27

Introducción

En este documento se presenta el diseño y armado de un secador solar para el deshidratado de pescado, el cual tiene una capacidad para secar entre 30 y 40 kg de producto, y opera con tres tecnologías de aprovechamiento de energía solar que son; un banco de colectores solares de calentamiento de agua, un banco de colectores solares de calentamiento de aire, y un banco de paneles solares fotovoltaicos, con lo cual el secador puede operar de forma continua durante las horas de insolación y hasta 6 horas de operación sin radiación solar o en periodos nocturnos.

El secado de alimentos es un método de preservación de alimentos, en el que se inhibe el crecimiento de bacterias, hongos, gérmenes, etc. a través de la remoción de agua mediante el proceso de evaporación. Con la reducción de la cantidad de agua se impide el crecimiento de los microorganismos que producen la descomposición y también reduce la actividad de las enzimas que provocan cambios indeseables en la composición química de los alimentos. El proceso de secado ayuda a obtener una mejor calidad del producto seco, un mayor período de tiempo de almacenamiento y una reducción de pérdidas por descomposición.

El secado de alimentos demanda un alto consumo de energía, debido al calor latente de cambio de fase requerido para evaporar el agua contenida en los productos y a la baja eficiencia de los secadores industriales actuales. La energía requerida para realizar el proceso de secado puede ser del orden del 10 al 20 % del consumo total de energía del proceso, por tal razón el uso de energía solar en aplicaciones de secado resulta atractivo y podría tener un gran potencial, disminuyendo el consumo de energía convencional hasta en un 80% de la energía total utilizada en dichos procesos.

México cuenta con un recurso solar importante, lo cual hace atractivo el desarrollo de secadores solares para el deshidratado de productos alimenticios, lo cual beneficiaría al sector agroindustrial.

Construcción del secador solar para deshidratado de productos pesqueros

Descripción del secador solar para el deshidratado de productos pesqueros

El deshidratador solar para productos pesqueros está conformado por tres secciones principales, la primera sección es la cámara o compartimiento para el secado de los productos pesqueros, la cual está compuesta por dos compartimentos en forma de ductos

rectangulares, que tienen la capacidad de alojar 10 charolas en forma de rejillas, con capacidad de 4 kg de producto por cada rejilla, para un total de 40 kg de producto fresco. Esta sección se encuentra aislada térmicamente y cuenta con dos puertas abatibles con sellado hermético y bisagras de seguridad.

La segunda sección de distribución del aire caliente está compuesta por un ducto rectangular que en su interior cuenta con una zona de 6 persianas de aluminio y vidrio que tienen la función de distribuir el flujo de aire caliente que pasará posteriormente al interior de la sección de secado. Esta sección se encuentra aislada térmicamente y cuenta con una puerta abatible con sellado hermético y bisagra de seguridad.

La tercera sección de direccionado del caudal de aire caliente está compuesta por un ducto rectangular, que en su interior cuenta con dos válvulas de compuerta que tienen la función de ingresar el aire caliente a la sección de secado mediante dos formas posible; la primera ingresando el aire caliente producido por el banco de colectores solares de calentamiento de aire, y la segunda ingresando el aire caliente producido por el banco de colectores solares de calentamiento de agua y el intercambiador de calor agua-aire. Esta sección se encuentra aislada térmicamente y cuenta con una puerta abatible con sellado hermético y bisagra de seguridad.

El secador solar cuenta con tres cámaras de transición de aire cónicas; una cámara de transición para el acoplamiento del ventilador-extractor y otra cámara de transición para el acoplamiento del intercambiador de calor agua-aire. Además, cuenta con una chimenea circular con diámetro de 4", para la salida del aire húmedo que será evacuado del secador solar.

El secador solar también cuenta con un intercambiador de calor agua-aire fabricado con tubos de cobre y aletas de aluminio con capacidad de 42 kW térmicos y un área efectiva de transferencia de calor de 1.5 m², y un ventilador-extractor de flujo de aire axial con rotor de jaula circular, acoplado a un motor eléctrico trifásico de 1 HP de capacidad que opera a 220 VCA y 1750 RPM. El secador solar en su conjunto esta soportado por una base-estructura de perfiles de acero cuadrado de 1.5" de acero y cuenta con patas niveladoras para una correcta alineación y nivelación. Todas las partes exteriores del secador solar y sus accesorios fueron recubiertas por dos capas de primario alquidálico y pintura anticorrosiva color blanco.

Subsistemas auxiliares del secador solar

El secador solar para el deshidratado de pescado dispone de tres sistemas auxiliares para su operación, los cuales se describen a continuación.

- Sistema solar de calentamiento de aire: está conformado por 6 colectores solares de calentamiento de aire, donde cada colector cuenta con un área de captación de 1.75 m² obteniendo un área total de 10.5 m², el arreglo de los colectores está distribuido en dos hileras en paralelo, con tres colectores en serie para cada una de las hileras. Los colectores solares están acoplados e interconectados al deshidratador mediante cámaras cónicas y ductos circulares fabricados en acero galvanizado calibre 20.
- Sistema solar de calentamiento de agua: está conformado por 6 colectores solares de calentamiento de agua, donde cada colector cuenta con un área de captación de 1.71 m² obteniendo un área total de 10.26 m², el arreglo del banco de colectores está distribuido en dos hileras en paralelo, con tres colectores en serie para cada una de las hileras. Este sistema solar térmico cuenta con un tanque de almacenamiento de agua caliente de 454 litros de capacidad y una bomba recirculadora de 1/2 HP de potencia.
- Sistema solar de generación eléctrica fotovoltaico: está constituido por tres paneles solares donde cada panel tiene un área de captación de 2.61 m² y 454 W de potencia eléctrica, para un total de 7.83 m² de área de captación con 1362 W de potencia. El sistema cuenta con 2 baterías de descarga profunda de 12 VCD y 115 Ah.

El secador solar se diseñó y construyó de forma modular con la finalidad de poder instalarse y moverse de un sitio a hacia otro, de una manera rápida y sencilla. Las especificaciones de diseño de la sección de secado, de distribución y de direccionamiento del aire caliente se presentan en las ilustraciones 1, 2 y 3 respectivamente.

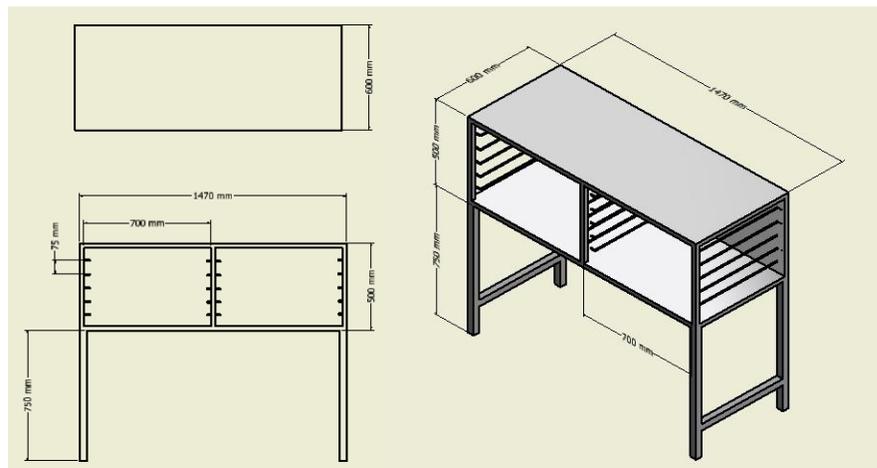


Ilustración 1: Sección de cámara de secado de productos pesqueros.

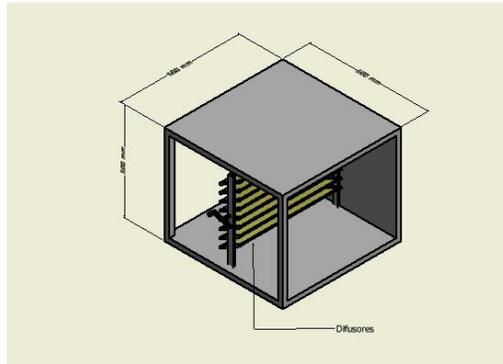


Ilustración 2: Sección de distribución del aire caliente en el interior del secador solar.

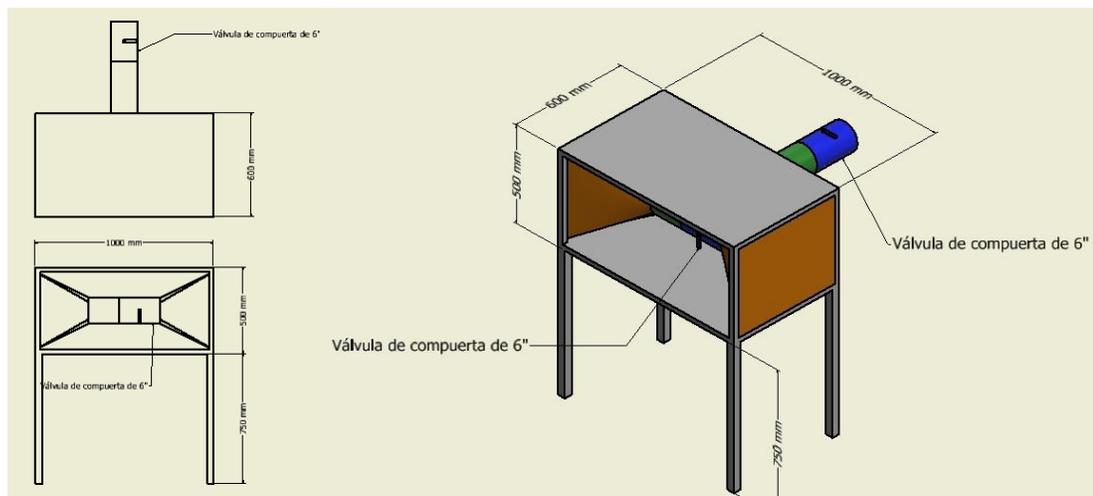


Ilustración 3: Sección de direccionamiento de aire caliente.

El acoplamiento de las secciones del secador solar se realizó mediante un sistema de bridas unidas mediante tornillos y sellos, en la ilustración 4 se muestra el ensamblado y acoplamiento de las secciones.

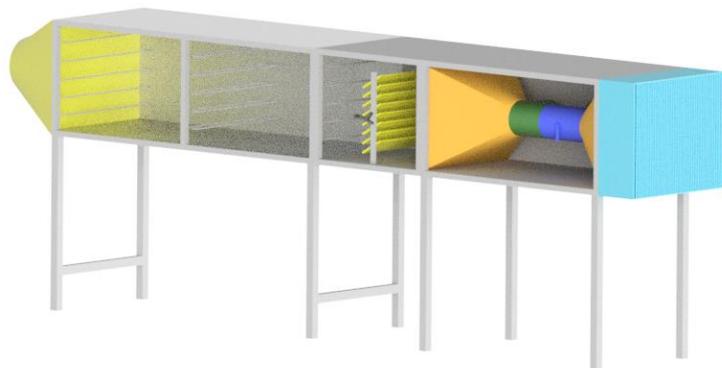


Ilustración 4: Ensamblado y acoplamiento de las tres secciones del secador solar.

Los materiales de construcción de las secciones que integran el secado solar se muestran en la Tabla 1, mientras que los materiales de los accesorios se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 1: Materiales de construcción del deshidratador solar.

Sección o parte del secador solar	Material de construcción
Sección de deshidratado del producto	Acero inoxidable 316 grado alimentario calibre 20
Sección de distribución de aire	Acero galvanizado calibre 20
Sección de entrada de aire caliente	Acero galvanizado calibre 20

Tabla 2: Materiales de los accesorios del deshidratador solar.

Accesorio	Material de construcción
Estructura de soporte del secador solar	Acero al carbón calibre 14
Ductos de conducción de aire	Acero galvanizado calibre 20
Cámaras de transición de aire	Acero galvanizado calibre 20
Bisagras, manijas y tornillería	Acero inoxidable 316 y acero al carbón

Dimensionado y diseño de intercambiador de calor aire-agua.

Para que el secador solar pueda operar de manera continua se requiere de un sistema de solar de calentamiento de aire que de manera directa suministra el flujo de aire caliente al secador durante el periodo donde haya suficiente insolación solar, mientras que para el periodo en que no haya suficiente radiación solar o en periodos nocturnos se utilizará un sistema de calentamiento solar de agua con almacenamiento de energía térmica, con este sistema y un intercambiador de calor agua-aire se podrá de manera indirecta suministrar el aire caliente necesario para la operación de secado. El intercambiador de calor agua-aire es un equipo muy importante para una operación eficiente y continua del secador, en la Tabla 3 se muestran las condiciones de operación del secador utilizadas para el diseño del intercambiador de calor que utilizara el secador solar.

Tabla 3: Condiciones de operación para el diseño del intercambiador de calor agua-aire.

Variable	LADO AIRE		LADO AGUA	
	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Presión máxima (P_m)	1.014	bar	2	bar
Densidad (ρ)	1.293	kg/m ³	997	kg/m ³
Densidad corregida por HR ($\rho_{c,hr}$) (70% HR)	0.833	kg/m ³	-----	-----
Humedad relativa (HR)	70	%	-----	-----
Capacidad térmica específica (C_p)	1008	J/kg-K	4186	J/kg-K

Capacidad térmica corregida ($C_{p,c}$) (70% HR)	990	J/kg-K	-----	-----
Flujo másico (\dot{m})	0.833	kg/s	0.1667	kg/s
Temperatura de entrada (T_e)	28	°C	80	°C
Temperatura de salida (T_s)	65	°C	35	°C
Caída de presión (ΔP)	160	Pa	2475	Pa
Calor transferido (Q_t)	31.08	kW	31.40	kW

Con las condiciones de operación planteadas, se realizaron los cálculos correspondientes utilizando el método de la diferencia de temperatura media logarítmica (DTML), obteniendo los parámetros para el diseño térmico del intercambiador de calor, en la Tabla 4 se presentan los resultados de la simulación y diseño del intercambiador de calor agua-aire para el secador solar.

Tabla 4: Resultado de la simulación y diseño del intercambiador de calor agua-aire.

Variable	Valor	Unidades
Diferencia de temperatura 1 (ΔT_1)	7	°C
Diferencia de temperatura 2 (ΔT_2)	15	°C
Logaritmo natural de ($\Delta T_1/\Delta T_2$)	-0.7621	adim
Factor de diseño (F)	0.92	adim
Coefficiente global (U_t)	1460	W/m ² -°C
Conductividad del aluminio	385	W/m ² -°C
Conductividad del cobre	205	kg/s
Diferencia de temperatura media logarítmica (DTML)	10.5	°C
Área total de transferencia de calor (A_t)	2.23	m ²
Longitud total de tubo (L_t)	20.1	m
Calor total transferido (Q_t)	34.12	kW

En la Ilustración 5 se presenta el intercambiador de calor agua-aire diseñado y construido para el secador solar de productos pesqueros.

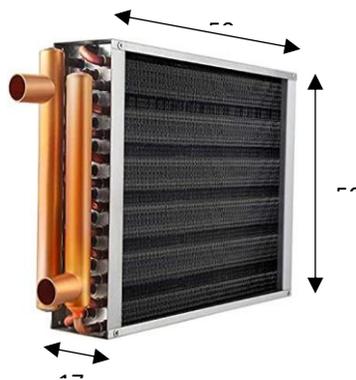


Ilustración 5: Intercambiador de calor agua -aire diseñado para el secador solar de productos pesqueros.

Las características y parámetros finales del intercambiador son las que se enlistan a continuación:

- Tubos de cobre de 3/8" sin costura
- Cada tubo mantiene 12 aletas por pulgada de aluminio
- Se configuraron 6 de filas, cada una con 12 tubos en vertical, en arreglo triangular
- El número total de tubos es de 72
- Conexiones a proceso de 1" NPT macho
- El área total de transferencia de calor es de 2.8 m²
- Marco y carcasa de acero galvanizado, con brida para fijación
- Las paredes externas del intercambiador cuentan con aislamiento de 1" de espesor

Dimensionado y diseño de sistema fotovoltaico para deshidratador solar.

El proceso de secado de productos alimenticios demanda una cantidad importante de energía durante la realización del proceso global de deshidratado. Por tal motivo surge la posibilidad de utilizar tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables.

Para el secador solar de productos pesqueros se diseñó e instaló un sistema solar fotovoltaico (SFV) para la generación de la energía eléctrica requerida para el accionamiento del ventilador-extractor del secador solar.

El SFV está constituido por tres paneles solares donde cada panel tiene un área de captación de 2.61 m² y 454 W de potencia eléctrica, para un total de 7.83 m² de área de captación con 1362 W de potencia. El SFV puede operar de manera continua acoplado al secador solar durante los periodos con que se cuente con irradiación solar, el sistema también cuenta con 2 baterías de descarga profunda de 12 VCD y 115 Ah.

En la Ilustración 6 se presenta el arreglo esquemático del sistema solar fotovoltaico acoplado al secador solar para productos pesqueros y el tablero del control respectivamente.

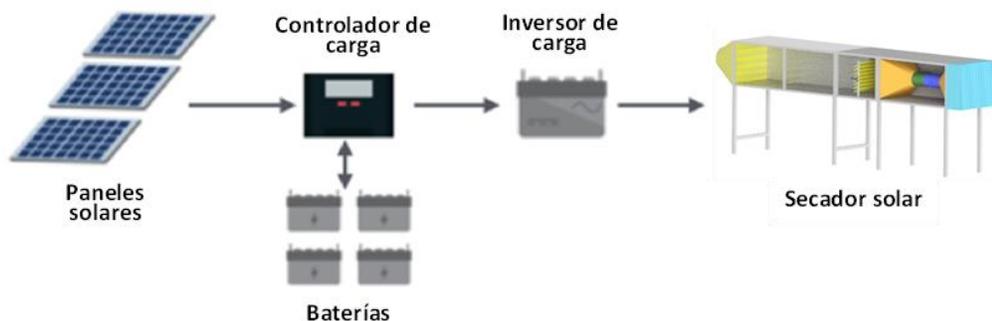


Ilustración 6: Diagrama esquemático del SFV acoplado al secador solar.

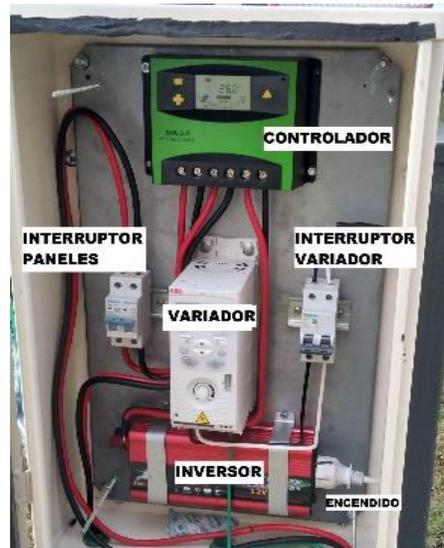


Ilustración 7: Arreglo del tablero de operación y control del sistema fotovoltaico.

Evaluación térmica del deshidratador solar sin producto.

Una vez construido y ensamblado el secador solar para productos pesqueros, con todos sus componentes y sistemas auxiliares, se realizó una evaluación experimental para evaluar el funcionamiento del secador sin carga térmica (sin producto en su interior). La evaluación se llevó a cabo de dos modos de operación y bajo condiciones controladas, la evaluación se realizó en el laboratorio de pruebas LAPECAS del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

La primera forma de evaluación del secador solar fue empleando el sistema solar térmico con almacenamiento de energía, empleando el agua caliente almacenada y circulándola a través del intercambiador de calor agua-aire, haciendo pasar aire a temperatura ambiente con el ventilador-extractos para ingresarlo al secador solar de manera indirecta.

La segunda forma segunda forma de evaluación fue empleando el sistema solar térmico de calentamiento de aire directo, esto se realizó haciendo circular aire a temperatura ambiente a través del arreglo de colectores solares de aire, utilizando el ventilador-extractor para que de manera directa ingrese el caudal de aire caliente al secador solar.

El diseño de experimentos que se desarrolló para la evaluación térmica del secador solar del primero modo descrito, consistió en operar el secador circulando agua caliente en un intervalo de temperaturas de operación a la entrada del intercambiador de calor agua-aire de 60° a 80° C, con un flujo másico de agua caliente promedio de 20.1 kg/min, para determinar la temperatura del aire a la entrada y la salida del secador, variando el caudal

volumétrico de aire en porcentajes de 15, 30, 45 y 60 % de la frecuencia del inversor del ventilador-extractor.

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del secador solar sin carga térmica realizada empleando el sistema solar de calentamiento de agua con almacenamiento térmico y el intercambiador de calor agua-aire.

Tabla 5: Resultados de la evaluación del secador solar sin carga térmica.

Variables fijas controladas	Temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,agua}$) = 60.3 °C Temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,aire}$) = 30.2 °C Flujo másico de agua (\dot{m}_{agua}) = 20.0 kg/min				
	15 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz	
Frecuencia del inversor	Valor	Valor	Valor	Valor	Unidades
Temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor ($T_{s,agua}$)	34.5	37.2	38.4	39.0	[°C]
Temperatura del aire a la entrada del secador solar ($T_{e,aire,ss}$)	58.4	57.1	56.9	54.1	[°C]
Temperatura del aire a la salida del secador solar ($T_{s,aire,ss}$)	51.1	49.1	48.9	46.1	[°C]
Caudal volumétrico del aire (\dot{V}_{aire})	44.2	99.4	147.9	199.7	[m ³ /h]

Variables fijas controladas	Temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,agua}$) = 69.2 °C Temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,aire}$) = 30.2 °C Flujo másico de agua (\dot{m}_{agua}) = 20.1 kg/min				
	15 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz	
Frecuencia del inversor	Valor	Valor	Valor	Valor	Unidades
Temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor ($T_{s,agua}$)	34.8	35.1	36.0	36.8	[°C]
Temperatura del aire a la entrada del secador solar ($T_{e,aire,ss}$)	67.7	66.5	64.1	63.3	[°C]
Temperatura del aire a la salida del secador solar calor ($T_{s,aire,ss}$)	58.9	57.3	56.2	55.4	[°C]
Caudal volumétrico del aire (\dot{V}_{aire})	42.1	98.1	147.5	199.4	[m ³ /h]

Variables fijas controladas	Temperatura del agua a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,agua}$) = 80.1 °C Temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,aire}$) = 30.2 °C Flujo másico de agua (\dot{m}_{agua}) = 20.0 kg/min				
	15 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz	
Frecuencia del inversor	Valor	Valor	Valor	Valor	Unidades
Temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor ($T_{s,agua}$)	44.1	44.9	45.4	46.0	[°C]
Temperatura del aire a la entrada del secador solar ($T_{e,aire,ss}$)	78.2	77.5	76.1	75.2	[°C]

Temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor ($T_{s,aire,ss}$)	68.5	67.1	66.5	65.2	[°C]
Caudal volumétrico del aire (\dot{V}_{aire})	41.8	97.2	150.1	199.5	[m ³ /h]

En la tabla 6 se muestran los resultados de la evaluación del secador solar para secado de productos pesqueros, operando en el modo dos, utilizando el sistema solar térmico de calentamiento de aire directo, y el diagrama de este modo de operación se presenta en la Ilustración 8.

Tabla 6: Resultados de la evaluación del secador solar sin carga térmica, operado con el sistema solar de calentamiento de aire.

Variables ambientales	Temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor ($T_{e,aire}$) = 32.1 °C Irradiancia solar promedio (I_{sp}) = 8209 W/m ²				
	15 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz	
Frecuencia del inversor	15 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz	
Variable medida	Valor	Valor	Valor	Valor	Unidades
Temperatura del aire a la entrada del secador solar ($T_{e,aire,ss}$)	61.5	58.7	56..1	54.2	[°C]
Temperatura del aire a la salida del secador solar ($T_{s,aire,ss}$)	58.5	55.1	53.2	51.9	[°C]
Velocidad del aire (\dot{v}_{aire})	2.4	5.1	7.7	10.4	[m/s]

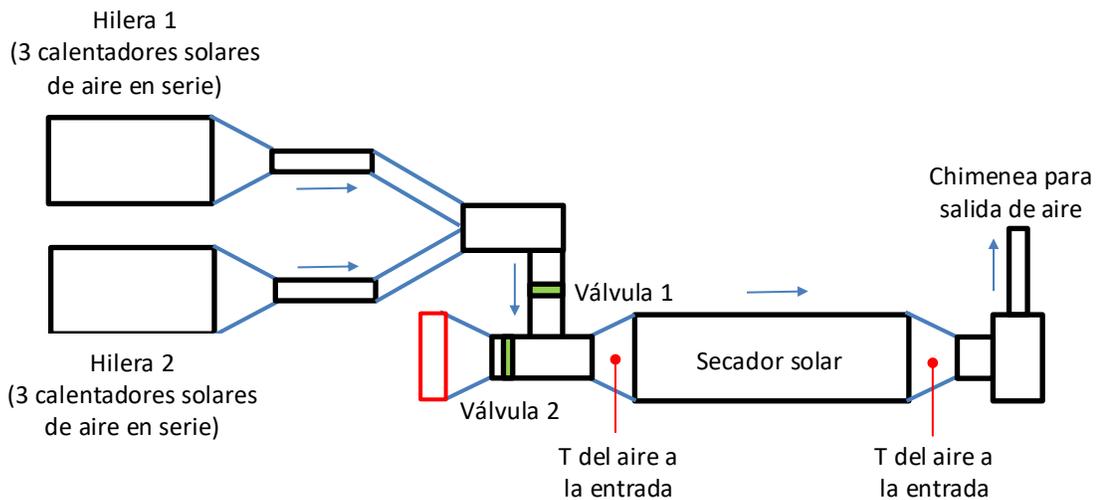


Ilustración 8: Diagrama del secador solar acoplado con el sistema solar térmico de calentamiento de aire de manera directa.

Descripción del funcionamiento del secador

El secado de productos alimenticios es un proceso de gran importancia ya que por medio de este se preserva la calidad del alimento, se facilita su almacenamiento y transporte, además de dar valor a agregado a los productos (Moheno-Barrueta et al., 2021). Tradicionalmente, el secado con energía solar es uno de los procedimientos técnicos más usados en la conservación de alimentos, ya que debido a su disponibilidad se disminuyen costos por consumo de energía. En términos generales, las plantas de secado solar (Ilustración 9) están constituidas por: (i) una cámara de secado donde se coloca el producto a deshidratar; (ii) un canal para conducción de aire caliente integrado por uno o más dispositivos conocidos como colectores solares, que puede estar o no inclinado y es donde interactúan directamente la radiación; (iii) ventilas, hoyos u orificios donde penetre el aire frío para ser calentado; (iv) así como chimenea o ducto para la salida del aire caliente.

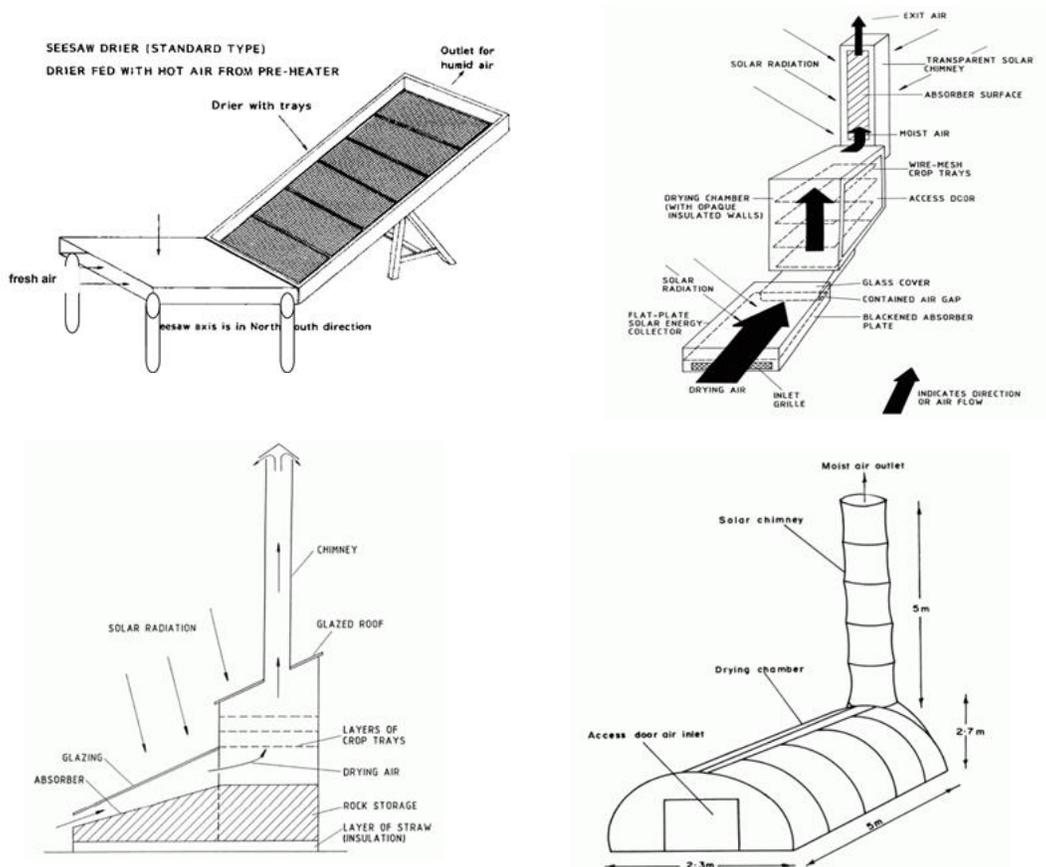


Ilustración 9: Diagrama técnico de algunos modelos de secadores solares que muestran los elementos más representativos en este tipo de sistemas (Weiss & Buchinger, 2003).

Específicamente, en este proyecto se contempla la integración de una planta de secado solar basado en una configuración de secador solar indirecto tipo túnel, ilustrado en la Ilustración 8.

La planta de secado solar se encuentra integrado un campo de colectores solares aire de MS, conectados en paralelo y en superficie inclinada (Ilustración 10 (a)); cámara de secado solar unida en uno de sus extremos al campo de colectores mediante ductos de acero inoxidable aislados térmicamente, y acoplando en el otro extremo un extractor de aire de con chimenea para generar un flujo forzado de aire (Ilustración 10 (b)); además, cuenta con un sistema auxiliar basado en energía fotovoltaica, conjunto de cuatro colectores solares (Ilustración 11), termotanque de 450 L (Ilustración 11), gabinete de control de calefacción solar eléctrica (Ilustración 11) y banco de baterías para la operación sin conexión a la red eléctrica del extractor de aire.

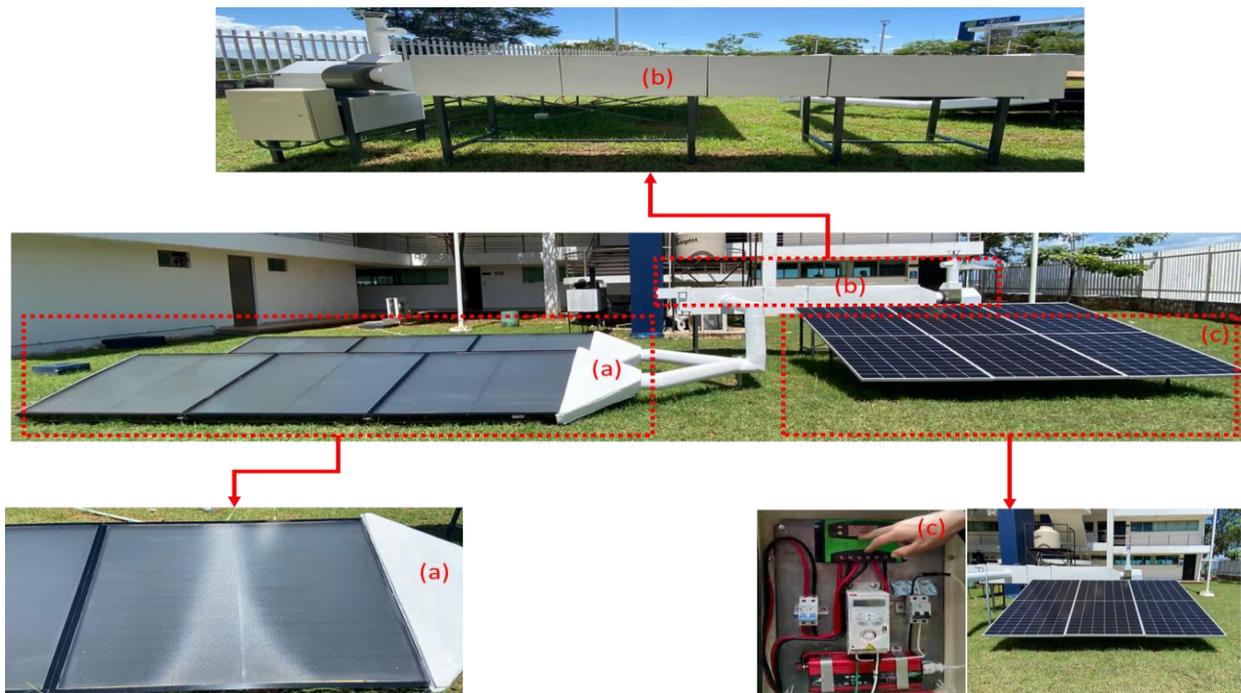


Ilustración 10: Composición de la planta de secado de solar basado en tecnología indirecta de tipo túnel.



Ilustración 11: Colectores solares, Termotanque y control de calefacción.

La operación de la planta (Ilustración 10 y 11), inicia al entrar aire a temperatura ambiente (T_{amb}) por la parte inferior de cada uno de los colectores. Los colectores están contruidos con una superficie traslucida que permite el paso de la radiación infrarroja favoreciendo el calentamiento del aire. Del mismo modo, el fondo color negro mate compuesto por una pintura de alta absorbancia permite absorber y ceder la mayor cantidad del calor al aire. Una vez ingresado el aire, este asciende a la parte superior del colector por efecto de densidad (fluido caliente), permitiendo la renovación de los espacios vacíos por el aire frío. Al pasar por el arreglo de colectores, el aire alcanzan una temperatura (T_s) definida por las condiciones de operabilidad y diseño de la planta. El aire a temperatura (T_s), se hace circular a través de los ductos para llegar a la cámara de secado. Se cuenta con un sistema de calefacción eléctrico, el cual consta del flujo de agua a través de un termotanque con sus respectivas válvulas, la calefacción del agua se debe gracias a las resistencias instaladas en el centro de control que tiene integrado una función automática, este sistema se utiliza en días de muy poca luz solar tales como días nublados y cuando empieza a disminuir la intensidad de la luz solar.

Al interior de la cámara de secado la velocidad del aire caliente es controlado a partir del extractor, la cual oscila entre 0.5 – 12 m/s. Después de que el aire caliente interactúa con el producto, este es expulsado mediante un chimenea y liberado hacia el ambiente (sumidero de energía). La Ilustración 12 ilustra con mayor detalle el interior de la cámara de secado y los procesos que involucra durante la interacción del aire caliente con el producto a secar. Como se aprecia esta está compuesta por una cámara de estrangulación del aire (Ilustración 12 (a)), una cortina de vidrio para control de dirección de flujo (Ilustración 12 (b)), el espacio para la deposición y secado del producto (Ilustración 12 (c)), y el componente de extracción de aire

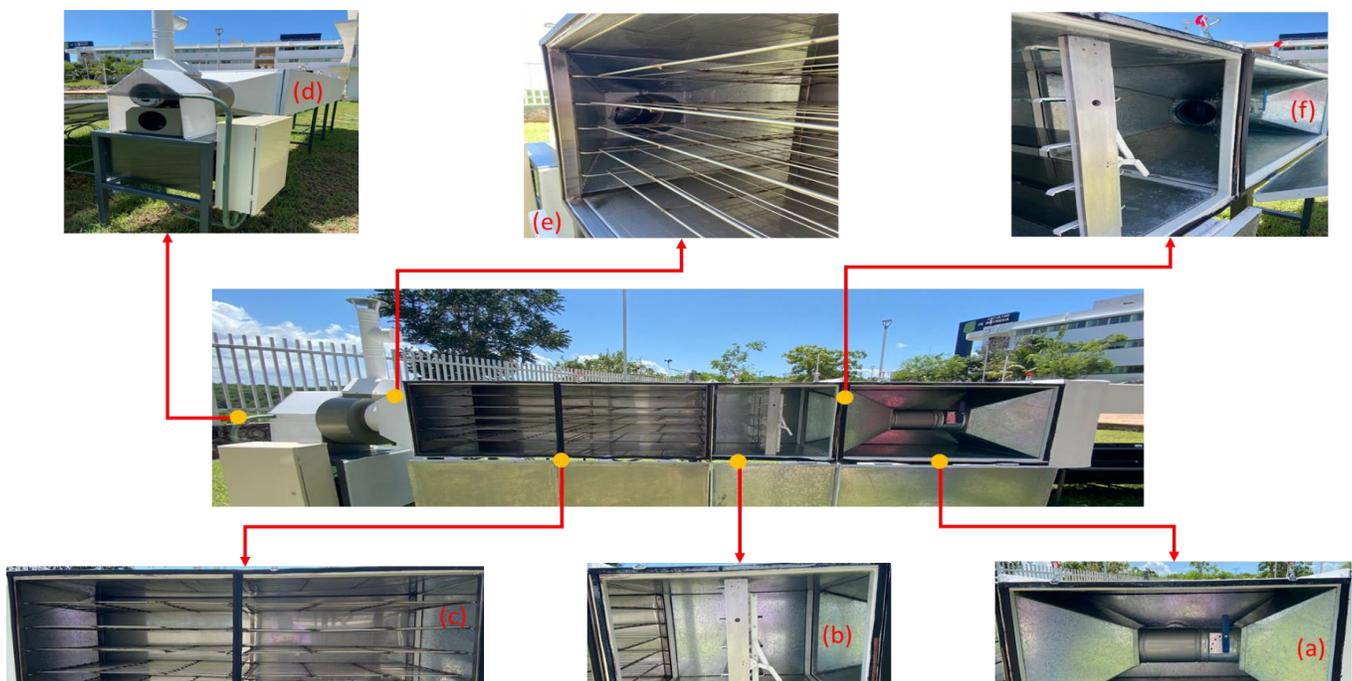


Ilustración 12: Componentes contenidos al interior de la cámara de secado de la planta termosolar.

caliente (Ilustración 12 (d)). De acuerdo la figura, el aire caliente entra por el extremo derecho, e inmediatamente se hace para una válvula de estrangulamiento para limitar la cantidad de fluido que circule a la cámara. La válvula cuenta con cinco posiciones para poder cuantificar la forma de operación. Una vez pasada por la válvula, el aire entra a una tobera donde se expande para cubrir la totalidad de la cámara. Al interior de la cámara, el aire circula por una cortina de vidrio fabricado mediante un mecanismo ventana persiana. El propósito de este mecanismo es controlar la forma en que el aire entra en contacto con el producto, ya sea de forma frontal o con algún ángulo de impacto de terminado. Una vez pasado por este componente, el aire por fin entra en contacto con el producto, el cual se encuentra depositado en un arreglo de charolas distribuido en 5 niveles. Los niveles están diseñados, para permitir el paso de aire homogéneo entre todo el producto a secar. Finalmente, el aire es extraído mediante un motor de corriente alterna, alimentado por paneles fotovoltaicos y conectado a un banco de baterías con su respectivo inverso. La velocidad del flujo de aire, el tiempo de operación, y la tasa de secado por lote, dependerán de las características del producto a secar.

De acuerdo con el modo de operación las plantas de secado solar se pueden dividir en tres tipos: (i) Sistemas basados en secado directo, (ii) sistemas basados en secado indirecto, (iii) y sistemas mixtos. Basado en lo anterior, la planta de secado solar considerada en el presente proyecto corresponde a un sistema de tipo indirecto.

Relación de la frecuencia con la temperatura y velocidad del secador

Para aumentar o disminuir la velocidad del aire a la salida del secador se debe modificar la frecuencia (Hz) y según esta, sea mayor o menor, se observa también un aumento o disminución de la temperatura dentro del secador. Según las especificaciones técnicas, el secador tiene la capacidad de alcanzar de 50-60 Hz de frecuencia que resultan de 10 m/s a 13 m/s de velocidad a la salida del secador. Para conocer a detalle esta varianza y obtener una relación entre la frecuencia y el aumento de velocidad y temperatura, se obtuvieron primero las características del motor:

Características del motor	
Potencia:	1 hp
Voltaje	220-440
Hz	60
RPM	1750
Flujo de aire	2978 m ³ /h
Fases	3
Marca	Air Technology
Modelo	CFD-9

Ilustración 13: Características de motor

El día 11 de noviembre de 2022, con el objetivo de analizar el comportamiento del secador, se realizó un análisis haciendo uso de un anemómetro colocado en la salida de aire del secador solar que permitió obtener los datos de velocidad y temperatura a medida que se modificaba la frecuencia desde el panel de control. El cálculo se realizó variando la frecuencia en múltiplos de dos, iniciando en 2 Hz y continuando con esta secuencia hasta alcanzar la frecuencia máxima, que en este caso fue de 50 Hz. De igual forma se utilizó un amperímetro de gancho para la obtención de la corriente y voltaje. Teniendo la captura de datos finalizada se obtuvieron los siguientes resultados (Ilustración 14):

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Temperatura (c)
2	0.815	46.6
4	0.941	47.1
6	1.364	47.8
8	1.638	48.7
10	1.876	49.8
12	2.33	50.6
14	2.772	51.8
16	3.094	54.3
18	3.368	55.5
20	3.922	56.5
22	4.221	56.8
24	4.664	57.5
26	5.179	58.6
28	5.565	59.1
30	6.095	60.1
32	6.531	61
34	7.223	61.4
36	7.57	62.1
38	7.867	62.1
40	8.332	62.7
42	8.679	63.1
44	9.166	63.8
46	9.584	63.8
48	10.22	62.7
50	10.49	62.7

Ilustración 14: Captura de datos de frecuencia, velocidad y temperatura

En la Ilustración 15 podemos observar la variación de los datos tanto en la frecuencia como en la velocidad y temperatura. En esta, se puede confirmar que a medida que frecuencia aumente, también habrá un aumento en la velocidad y la temperatura; es hasta las últimas mediciones que la temperatura llega a mantenerse estable, sin embargo, se tuvo una disminución de 1 C° entre los 46 y 48 Hz de frecuencia, esto debido a una nube que cubrió el cielo. A continuación, se muestra la gráfica que representa dicha relación:

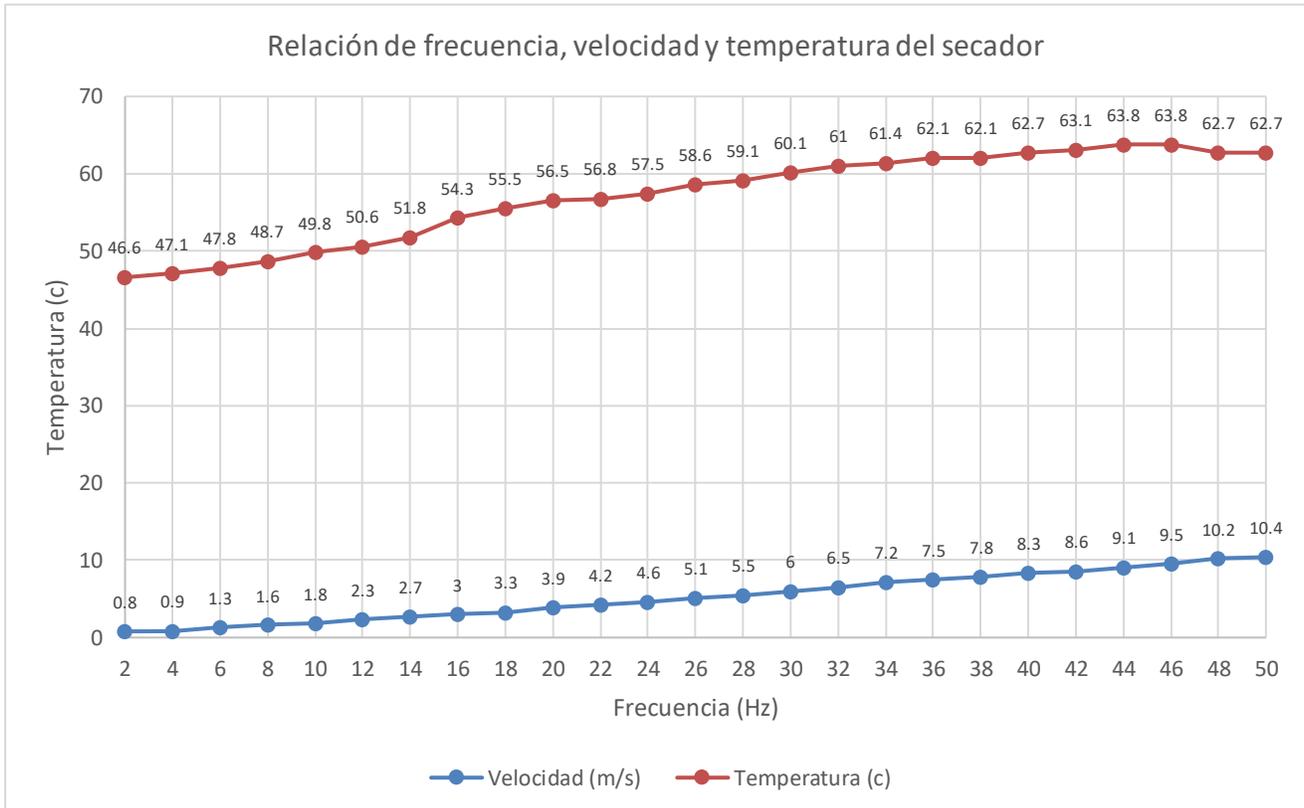


Ilustración 15: Incremento de Frecuencia, Velocidad y Temperatura



Ilustración 16: Captura de datos

En las ilustraciones anteriores se muestra la captura de datos realizada con un multímetro de gancho para la obtención de la corriente y el voltaje del secador. El voltaje en corriente directa a la entrada del inversor es de 25.97 v y este no varió, aunque se aumentara la frecuencia, después se hizo la medición del voltaje en corriente alterna a la salida del inversor y nos arrojó un voltaje de 205.9 v. Por último, se tomó el amperaje a la salida del inversor resultando en 000.3 A.

Construcción y diseño de un instrumento de monitoreo de datos

Se diseñó y construyó un sistema automático para el monitoreo de datos relevantes en el proceso del secado solar. El objetivo de la instrumentación es medir y almacenar datos de humedad, temperatura, irradiancia y masa durante el proceso de secado. Estos datos serán muy útiles para evaluar la cinética o el rendimiento de secado y ayudarán a determinar las condiciones óptimas para el secado de productos pesqueros.

Descripción:

El sistema está compuesto por 10 subsistemas o componentes que se describen a continuación:

1. **Módulo de tiempo real.** Este subsistema mide el tiempo, fecha y hora. Está basado en el circuito integrado DS3231. Su función es registrar la fecha y la hora de cada medición. Como cualquier reloj, cuenta con su propia batería.



Ilustración 17: Módulo de tiempo real.

2. **Módulo de memoria SD.** Este subsistema almacena el tiempo y los datos en una memoria permanente, para que después pueda ser leída por cualquier computadora. Si se almacenan los datos y el tiempo de todos los sensores cada minuto, la memoria de 32 GB tendrá que ser cambiada cada 500 años. O sea, está sobrado el sistema.



Ilustración 18: Módulo de memoria SD.

3. **Módulo bluetooth.** Este subsistema permite la comunicación inalámbrica entre el microcontrolador Arduino Mega y otro dispositivo que cuente con este tipo de interfaz, como cualquier teléfono celular o tablet que se encuentra en el mercado. Siempre es útil esta interfaz para tener un acceso cómodo a los datos que se van generando.

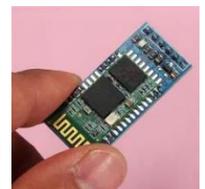


Ilustración 19: Módulo bluetooth.

4. **Pantalla OLED de 1.3 pulgadas.** Este componente permite visualizar los datos medidos y ayuda a fijar las condiciones del monitoreo, o sea, el periodo de medición y el número de sensores que se desea medir. Consume muy poca energía. Es monocromático.



Ilustración 20: Pantalla OLED de 1.3 in.

5. **Encoder rotatorio.** Este es un componente para introducir datos al microcontrolador. Cuando se mueve en un sentido se incrementa un valor, en sentido contrario, disminuye y al aplastarlo se introduce el dato. Con ese se fija el periodo de medición de todos los sensores, y el número de sensores que se desea registrar.



Ilustración 21: Encoder rotatorio.

6. **Microcontrolador Arduino Mega 256.** Este es el componente principal del instrumento de monitoreo. Los sensores y los anteriores componentes están conectados a éste. Este módulo guarda en su memoria permanente un programa que es el encargado de leer sensores y tiempo y enviar esos datos a una PC, a interfaz bluetooth, a la pantalla OLED y a la memoria SD.



Ilustración 22: Microcontrolador Arduino Mega 256.

7. **Sensor de temperatura DS18B20.** El sistema cuenta con 10 o 40 de estos. Miden temperatura de -40 a 125 grados centígrados. Su tiempo de respuesta depende de la resolución, pero es menor a los 2 segundos. Vienen encapsulados en acero inoxidable. Ya que cada uno cuenta con un número de serie que lo identifica, se pueden usar miles de estos en paralelo gastando solo un canal de medición del Arduino Mega. Estos sensores se colocan en diferentes puntos donde se espera que cambie la temperatura y fuera del dispositivo para medir temperatura ambiente.



Ilustración 23: Sensor de temperatura DS18B20.

8. **Sensor de humedad y temperatura DHT22.** El sistema cuenta con 4 de estos sensores. Miden humedad relativa de 0 a 100% y temperatura de -40 a 80 grados centígrados. Existen varias librerías para su utilización para placas Arduino Mega. Se utiliza un canal digital del Arduino Mega para cada uno de estos sensores. Estos se colocan en sitios de interés del dispositivo secador, como dentro y fuera de él, o antes y después del flujo de aire sobre el producto a secar.



Ilustración 24: Sensor de humedad y temperatura DHT22.

9. **Sensor de masa.** La masa del producto a secar es un parámetro muy importante dentro del proceso de secado solar. Esta masa debe de ir disminuyendo durante el proceso de secado. La masa se mide mediante la deformación por el peso provocado en una barra de aluminio la cual tiene adherida una resistencia eléctrica. La resistencia cambia con la deformación y este cambio produce un cambio de voltaje que es leído por un circuito integrado HX711. Este circuito envía un número entero al Arduino Mega, que es calibrado para conocer la masa. Los rangos de medición van de 1 a 50 Kg. Y su resolución va de 1 a 50 gramos. Este sensor se coloca bajo una bandeja con producto que se quiera secar.

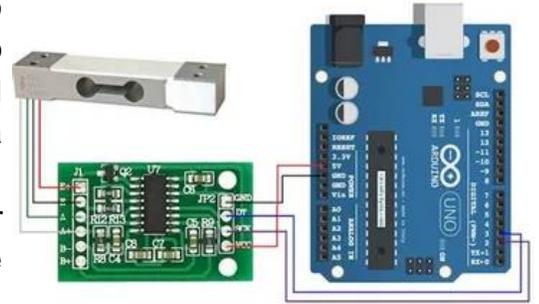


Ilustración 25: Sensor de masa.

10. **Sensor de irradiancia.** Cuando se evalúan sistemas solares es vital medir la cantidad de energía solar que está utilizando determinado dispositivo. Ya que la energía captada por un dispositivo de área A es la integral en el tiempo de la irradiancia por el área, conociendo la irradiancia se puede calcular la energía. Para esto se utilizaron pequeños módulos fotovoltaicos con una resistencia de 15 ohms conectada a ellos para que el voltaje producido sea proporcional a la irradiancia. Para éstos, la ecuación es aproximadamente $I_{rr} = 2.71 V$, donde I_{rr} es la irradiancia en W/m^2 y V es el voltaje en milivolt. El sistema cuenta con 4 de estos sensores. Estos sensores se colocan en las superficies de captación solar del dispositivo.



Ilustración 26: Sensor de irradiancia.

El diagrama eléctrico del circuito se encuentra descrito en la siguiente ilustración.

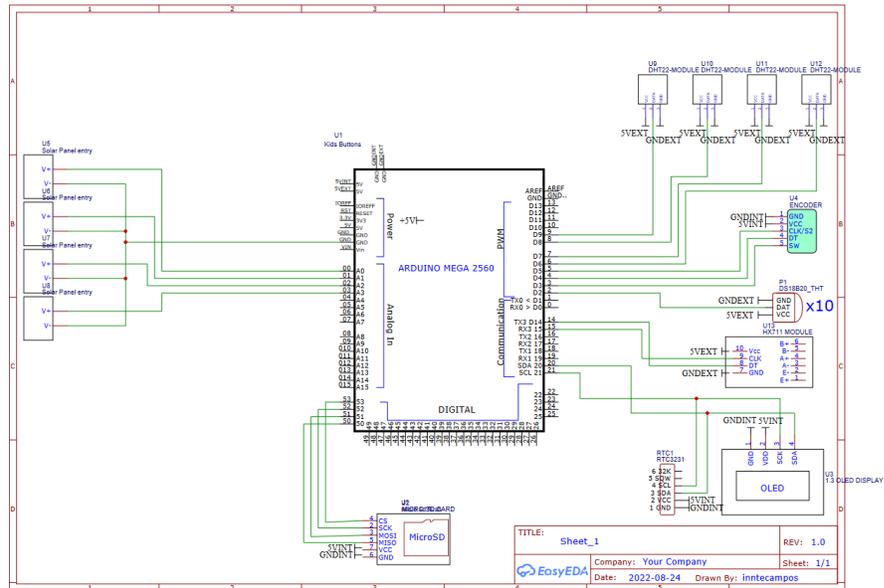


Ilustración 27: Diagrama del circuito eléctrico.

Ilustración de este en forma física en donde se pueden apreciar algunos de los componentes ya mencionados.



Ilustración 28: Instrumento para monitoreo de datos.

Resultados

Se realizó una prueba sin producto durante un día y medio con sensores de temperatura juntos, sensores de humedad y temperatura juntos, sensor de masa con una masa de 934 gramos sobre él y se midieron 4 irradiancias en el mismo plano. Todo esto con el objetivo de medir la dispersión de los datos entregados por los sensores, ya que, en principio, deberían medir lo mismos todos los sensores.

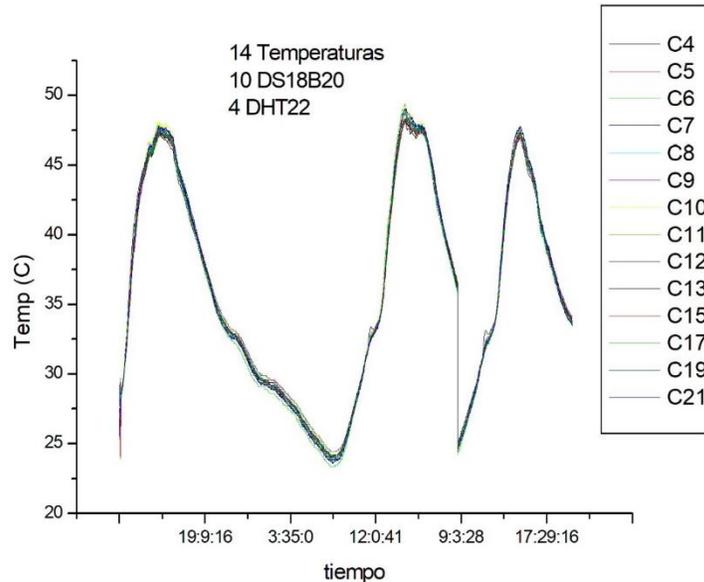
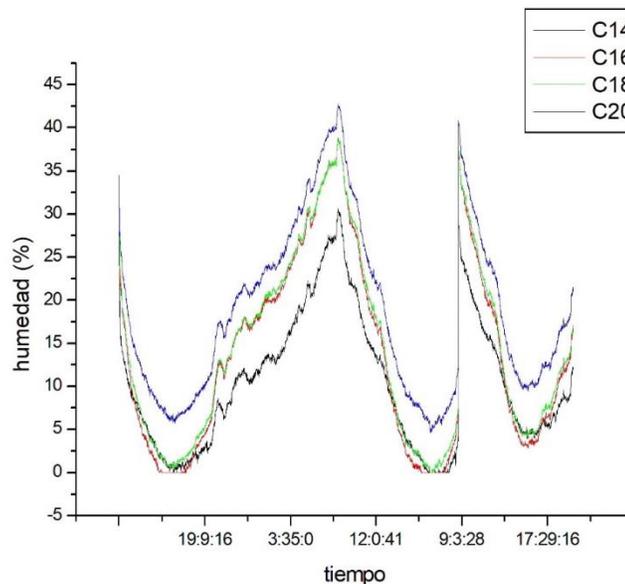


Ilustración 29: Sensores de Temperatura DS18B20 y DHT22.

Se realizó una prueba de 37 horas, la dispersión de la temperatura fue menos de 0.5 grados centígrados para ambos tipos de sensores.



Los sensores de humedad son, por su naturaleza menos precisos que el resto, uno de ellos tuvo diferencias sistemáticas de

Ilustración 30: Resultados de los sensores de humedad.

aproximadamente 6%, lo cual no es alarmante y otro de ellos tuvo diferencias variables. Esto es normal para este tipo de sensores.

Sensor de masa.

La diferencia de los datos fue de 6 gramos en 37 horas, lo cual es un dato aceptable.

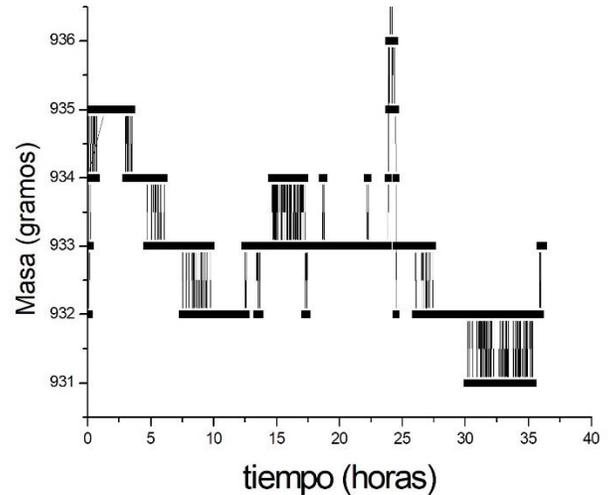


Ilustración 31: Resultados de los sensores de masa.

Sensores de irradiancias

La diferencia de los datos fue menor a 10 W/m², de igual manera es un dato aceptable.

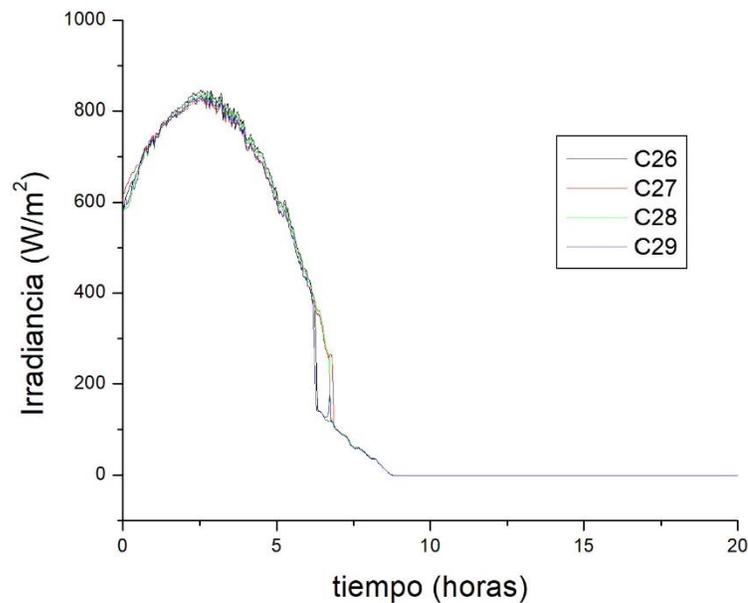


Ilustración 32: Resultado de los sensores de irradiancia.

Conclusiones respecto a la instrumentación

El sistema funciona de manera aceptable. Usa una batería de 5000 mAh lo cual le da cerca de 2 días de autonomía. Almacena datos durante 500 años midiendo todos los sensores cada minuto. En la siguiente tabla se resumen sus características.

Tabla 7: Resultados de la prueba de instrumentación.

	canales	mínimo	máximo	Resolución	Error
Temperatura DS18B20	10	-40 C	125 C	0.1 C	< 1 C
Temperatura DHT22	4	-40 C	80 C	0.1 C	< 1 C
Humedad	4	0	100 %	0.1 C	< 6 %
masa	1	0	5000 gramos	0.1 gramo	< 6 gramos
Irradiancia	4	0	1200 W/m ²	1 W/m ²	<10 W/m ²

Conclusiones

Después de realizar el diseño, instalación y evaluación del secador solar para productos pesqueros sin producto en su interior, se pudo concluir lo siguiente:

Se instaló el secador solar para productos pesqueros con todos sus componentes en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. Se instaló el sistema solar térmico para calentamiento de aire y se acoplo al secador solar, para poder operar el secador con el suministro de aire caliente de manera directa, y realizar su evaluación al operar de este modo. Se instaló el sistema solar fotovoltaico (SFV) y se acoplo al secador solar, lo que permite suministrar la demanda de energía eléctrica que demandara el secador solar. Con este sistema fotovoltaico se podrá operar el secador de manera continua cuando haya días soleados y también en días nublados o periodos nocturnos, con el almacenamiento de energía del banco de baterías. Al operar el secador solar con el sistema solar térmico de calentamiento de agua con almacenamiento (modo de operación 1), para calentar e ingresar el aire caliente al secador de forma indirecta se obtuvieron temperaturas promedio en el interior de la cámara de secado de 52°C, 57°C y 64°C al ingresar el agua al intercambiador de calor agua-aire a 60.3 °C, 69.2°C y 80.1 °C respectivamente. Al operar el secador solar con el sistema solar de calentamiento de aire (modo de operación 2), para calentar e ingresar el aire al secador de manera directa, se obtuvieron temperaturas promedio en el interior de la cámara de secado de 54.2 °C a 61.5 °C con velocidades promedio de aire de 2.4 m/s 10 m/s respectivamente, lo cual es aceptable que para el secado de productos pesqueros se requiere de temperaturas media de 55 °C con caudales promedio de 2.5 m/s en el interior del secador. Con todo lo anterior mencionado podemos deducir que el deshidratador solar tipo túnel para 40 kg de productos pesqueros cumple con los parámetros necesarios para el proceso de secado.

Anexo de Ilustraciones y tablas

Ilustración 1: Sección de cámara de secado de productos pesqueros.....	4
Ilustración 2: Sección de distribución del aire caliente en el interior del secador solar.....	5
Ilustración 3: Sección de direccionamiento de aire caliente.....	5
Ilustración 4:Ensamblado y acoplamiento de las tres secciones del secador solar.....	5
Ilustración 5: Intercambiador de calor agua -aire diseñado para el secador solar de productos pesqueros.....	7
Ilustración 6: Diagrama esquemático del SFV acoplado al secador solar.....	8
Ilustración 7: Arreglo del tablero de operación y control del sistema fotovoltaico.....	9
Ilustración 8: Diagrama del secador solar acoplado con el sistema solar térmico de calentamiento de aire de manera directa.....	11
Ilustración 9: Diagrama técnico de algunos modelos de secadores solares que muestran los elementos más representativos en este tipo de sistemas (Weiss & Buchinger, 2003).....	12
Ilustración 10: Composición de la planta de secado de solar basado en tecnología indirecta de tipo túnel.....	13
Ilustración 11: Colectores solares, Termotanque y control de calefacción.....	13
Ilustración 12: Componentes contenidos al interior de la cámara de secado de la planta termosolar.....	14
Ilustración 13: Características de motor.....	15
Ilustración 14: Captura de datos de frecuencia, velocidad y temperatura.....	16
Ilustración 15: Incremento de Frecuencia, Velocidad y Temperatura.....	17
Ilustración 16: Captura de datos.....	18
Ilustración 17: Modulo de tiempo real.....	19
Ilustración 18: Modulo de memoria SD.....	19
Ilustración 19: Modulo bluetooth.....	19
Ilustración 20: Pantalla OLED de 1.3 in.....	19
Ilustración 21: Encoder rotatorio.....	20
Ilustración 22: Microcontrolador Arduino Mega 256.....	20
Ilustración 23: Sensor de temperatura DS18B20.....	20
Ilustración 24: Sensor de humedad y temperatura DHT22.....	20
Ilustración 25: Sensor de masa.....	21
Ilustración 26: Sensor de irradiancia.....	21
Ilustración 27: Diagrama del circuito eléctrico.....	22
Ilustración 28: Instrumento para monitoreo de datos.....	22
Ilustración 29: Sensores de Temperatura DS18B20 y DHT22.....	23
Ilustración 30: Resultados de los sensores de humedad.....	23
Ilustración 31: Resultados de los sensores de masa.....	24
Ilustración 32: Resultado de los sensores de irradiancia.....	24
Tabla 1: Materiales de construcción del deshidratador solar.....	6
Tabla 2: Materiales de los accesorios del deshidratador solar.....	6
Tabla 3: Condiciones de operación para el diseño del intercambiador de calor agua-aire.....	6
Tabla 4: Resultado de la simulación y diseño del intercambiador de calor agua-aire.....	7
Tabla 5:Resultados de la evaluación del secador solar sin carga térmica.....	10
Tabla 6: Resultados de la evaluación del secador solar sin carga térmica, operado con el sistema solar de calentamiento de aire.....	11
Tabla 7: Resultados de la prueba de instrumentación.....	25



PLANTA COMUNITARIA PARA EL SECADO DE PRODUCTOS PESQUEROS OPERADA CON ENERGÍA TERMOSOLAR PARA SU INTEGRACIÓN EN COMUNIDADES RURALES

PRIMERA ETAPA

