



**Cooperativa:
"Planta comunitaria para el secado de productos pesqueros
operada con energía termosolar para su integración en
comunidades rurales"**

**PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y
EFICIENCIA DE CONVERSIÓN DE CADA UNO DE LOS
COMPONENTES Y DE TODA LA PLACOSSAM EN
FORMA INTEGRAL**



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

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TEÓRICO	3
3. METODOLOGÍA	4
3.1 Captadores solares	4
3.2 Intercambiador de calor	4
3.3 Páneles fotovoltaicos	5
3.4 Invernaderos	5
3.5 Rendimiento integral de la planta	6
4. IMPLEMENTACIÓN	8
5. RESULTADOS	11
6. CONCLUSIONES	16
7. PANORAMA DE MEJORA	12
7.1 Colectores solares	12
7.2 Invernaderos	14
8. REFERENCIAS	16

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías solares ha tenido un mayor auge durante los últimos años; para su desarrollo es necesario utilizar materiales que cumplan con diferentes características como lo es la larga resistencia a la exposición de los rayos solares.

En general, la idea de probar diferentes materiales obedece a la búsqueda de mejorar el comportamiento térmico de los sistemas de calentamiento, a fin de sacar el mayor provecho a los materiales, esto es, tener una mejor relación costo-beneficio.

Por esta razón, resulta importante contar con procedimientos que permitan evaluar la eficiencia térmica de las tecnologías solares.

La Planta de Colectores Solares para el Secado de Alimentos Marinos (PLACOSSAM) es un sistema de captación solar que utiliza la energía proveniente del sol para llevar a cabo procesos de secado en alimentos. Una fracción de la energía captada es aprovechada en forma térmica para evaporar parte del agua que contienen los alimentos. La otra fracción de energía es convertida en energía eléctrica para alimentar un ventilador, 2 extractores de aire, una bomba y una resistencia eléctrica, todos estos elementos ayudan mover la masa de aire desde los colectores hasta el invernadero para favorecer el proceso de secado. La planta consta de lo siguientes componentes: un arreglo de quince captadores solares dispuestos en tres series paralelas (cada serie formada por cinco captadores), un intercambiador de calor, un tanque de almacenamiento de agua con resistencia eléctrica y bomba recirculadora, un arreglo de 16 paneles fotovoltaicos y dos invernaderos. La Figura 1 muestra la distribución de la planta.



Figura 1. Planta de secado solar.

2. MARCO TEÓRICO

Se entiende por eficiencia térmica al cociente obtenido al dividir la energía que fue transferida al fluido entre el total de la energía que captó el sistema. Para el caso del sistema en donde se tiene un flujo de calor, se puede establecer un periodo de tiempo de transferencia de calor y evaluar el cociente resultante, esto usando la ecuación (1).

$$\eta = \frac{\dot{q}_{fluido}}{\dot{q}_{total}} \quad (1)$$

Donde \dot{q}_{fluido} es la tasa de transferencia de calor hacia el fluido y \dot{q}_{total} es la tasa de transferencia desde el exterior hacia el sistema. Una forma de determinar el valor de \dot{q}_{fluido} es mediante la ecuación (2).

$$\dot{q}_{fluido} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2)$$

Siendo \dot{m} el flujo másico en kg/s, C_p el calor específico a presión constantes (y a la temperatura promedio del fluido) en $kJ/kg\ K$ y ΔT es la diferencia de temperaturas que hay entre la salida y la entrada del sistema que se evalúa.

Para determinar el flujo de calor que ganan las tecnologías solares se utiliza la ecuación (3).

$$\dot{q}_{total} = GA \quad (3)$$

En donde G es la irradiancia solar global que incide sobre el plano de captación en W/m^2 y A es el área de captación en m^2 .

El calor que no puede ser aprovechado para transferirlo al fluido se pierde hacia el ambiente.

Otro concepto importante para la evaluación de los sistemas es el de estado transitorio y el de estado estacionario. En el estado transitorio el valor de los parámetros del sistema sufre cambios conforme transcurre el tiempo, mientras que, en el estado estacionario, el valor de los parámetros se mantiene sin cambios.

Para el caso de los sistemas solares, en los cuales la fuente de energía proviene del sol, la evaluación a lo largo del día obedecería a un fenómeno transitorio al tener la variación de la irradiancia solar y de la temperatura del ambiente. Con base en los procedimientos marcados por la norma ISO9806:2017 las evaluaciones de los sistemas de calentamiento solar se realizan en un periodo de tiempo que deja centrado el medio día solar, de modo tal que la variación de la irradiancia (flujo de calor al sistema) pueda considerarse constante y así poder usar las ecuaciones para un estado estacionario.

3. METODOLOGÍA

Para la evaluación térmica de los elementos que componen la planta de secado, se tiene que llevar a cabo una instrumentación con sensores que permitan medir los valores de los parámetros de transferencia de calor. A continuación, se describe un procedimiento para evaluar cada uno de los elementos del sistema.

3.1 Captadores solares

Para evaluar esta sección se requiere instalar un sensor de temperatura ambiental (como lo marca la norma ISO9806:2017) y uno a la salida de cada una de las series de captadores solares, también se deberá instalar un piranómetro lo más cercano posible a los captadores y que tenga la misma inclinación que la superficie de captación. Por último, se deberá instalar un sensor de la velocidad del aire a la salida de cada serie de captadores. Para calcular el flujo másico se puede hacer uso de la ecuación (4).

$$\dot{m} = vA_t\rho \quad (4)$$

Donde v es la velocidad del aire en m/s , A_t es el área transversal que atraviesa el aire en m^2 y ρ es la densidad del aire a la temperatura promedio en kg/m^3 , la cual se calcula mediante la ecuación (5), válida para T en Celsius.

$$\rho_{aire} = 1.2974 - 0.0048T + 0.00001035T^2 + 0.00000001067T^3 \quad (5)$$

El periodo de observación será en un horario que comprenda desde 10 minutos antes hasta 10 minutos después del medio día solar (tiempo basado en la NMX-ES-001-NORMEX-2005). Sin embargo, se deberá arrancar el sistema desde 30 minutos antes del mediodía solar, porque al principio habrá muchas partes del sistema a temperatura ambiente y el sistema deberá alcanzar el estado estacionario.

Una vez obtenidos los valores, éstos se podrán agrupar en periodos de 5 minutos, de modo tal que se obtendrán 4 conjuntos de datos, a los cuales se les calculará el valor promedio de cada parámetro (temperatura ambiente, irradiancia, temperatura de salida y velocidad del aire) para así iniciar el cálculo de la eficiencia térmica como se muestra en la ecuación (1).

3.2 Intercambiador de calor

Para evaluar el intercambiador de calor en términos de eficiencia térmica se establece el cociente de la energía transferida al aire entre la energía disponible de la corriente de agua. La ecuación (6) muestra el cociente mencionado.

$$\eta_{inter} = \frac{\dot{q}_{aire}}{\dot{q}_{agua}} \quad (6)$$

Los valores de \dot{q}_{aire} y \dot{q}_{agua} pueden calcularse usando la ecuación (2). Para obtener los valores en la corriente de aire se deberá instalar un sensor de

temperatura a la entrada y otro a la salida del intercambiador de calor, además se deberá instalar un sensor de velocidad de aire para determinar el flujo de aire de acuerdo a la ecuación (4).

Para obtener los valores en la corriente de agua se requieren de algunas consideraciones debido a que la introducción de sensores al circuito de agua no es posible (por las uniones que se encuentran unidas de manera permanente). A la entrada y a la salida del intercambiador de calor se tienen tramos de tubería de cobre (el cuál es un excelente conductor), razón por la cuál se contempla instalar un sensor de superficie en cada extremo y cubrirlo con un aislante, de esta manera se tendrá una estimación de las temperaturas de entrada y salida. Para determinar el flujo de agua se deberá revisar la ficha técnica de la bomba y revisar las curvas de flujo para diferentes caídas de presión, el valor de caída de presión del intercambiador de calor es un dato que proporciona el fabricante, de modo que puede obtenerse una buena suposición del flujo volumétrico del agua y podrá obtenerse el flujo másico usando la ecuación (4).

Para tomar los valores antes mencionados se deberá realizar la prueba estando en estado estacionario.

3.3 Paneles fotovoltaicos

Para determinar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos se toma en cuenta que se tienen dos diferentes arreglos, cada uno de 8 paneles. El primer arreglo alimenta la resistencia eléctrica de 3 kW ubicada al interior del tanque de almacenamiento de agua, mientras que el segundo arreglo alimenta un ventilador (consumo de 2.24 kW), una bomba de agua (0.37 kW) y 2 extractores de aire (0.19 y 0.12 kW respectivamente).

Para medir la energía que reciben los paneles fotovoltaicos se usa la ecuación (3). Será necesario colocar un piranómetro a la misma inclinación de los paneles y medir el área de apertura para 8 paneles en cada arreglo.

Ahora, para el primer arreglo resulta importante medir cuánta de la energía captada por los paneles para calentamiento de agua es la que se transfiere al agua dentro del termotanque. Por esta razón, se deberá instalar un sensor de temperatura dentro del termotanque y durante el periodo comprendido de los 10 minutos antes a los 10 minutos después del medio día solar se deberá encender la resistencia térmica. Al minuto 9 de haber iniciado la evaluación, se encenderá la bomba de agua para homogenizar el agua del tanque, es importante resaltar que no deberá estar el flujo de aire pasando por el intercambiador para así remover la menor cantidad de calor posible en el intercambiador.

La eficiencia para el primer arreglo de paneles se determinará dividiendo la cantidad de energía ganada por el agua en el intervalo de 20 minutos entre la energía captada por los paneles.

Para el segundo arreglo, se deberá medir la potencia con la que opera cada componente eléctrico. Para medir la potencia en los componentes se requerirá de un multímetro de gancho que permita medir la corriente mientras los

componentes están trabajando. Una vez medida la corriente se usará la ecuación (7) para calcular la potencia:

$$P = V I \quad (7)$$

Donde P es la potencia en Watts (W), V es el voltaje en voltios (V) e I es la corriente en amperios (A).

La eficiencia del segundo arreglo se obtendrá dividiendo la suma de las potencias de cada componente entre el calor captado por los 8 paneles.

3.4 Invernaderos

Para la evaluación de los invernaderos primero se determina la energía que reciben en cada una de sus caras: las 4 laterales y la superior. La energía recibida se determina orientando el piranómetro en cada una de las 5 direcciones antes mencionada, comenzando 10 minutos antes del mediodía solar con una dirección y cambiando la orientación cada 4 minutos. Es importante mencionar que tendrá que evaluarse cada invernadero con un piranómetro diferente, para que las mediciones se hagan de forma simultánea. Se obtendrá la irradiancia promedio en cada intervalo de tiempo y se supondrá constante para los 20 minutos de la prueba. La irradiancia promedio obtenida deberá multiplicarse por el área transversal a la radiación de acuerdo a la ecuación (3).

Como el invernadero es un sistema de varias zonas con intercambio de masa, el procedimiento para determinar el calor ganado será mediante un balance de masa y energía. El balance de masa considera el ingreso del aire desde la línea del ventilador, la salida de aire debidas al extractor y un intercambio positivo o negativo debido a elementos no sellados como la puerta, la unión con el suelo u otras uniones en general. El balance de masa queda como se muestra en la ecuación (8).

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{vent} - \dot{m}_{extrac} + \dot{m}_{inter} \quad (8)$$

El término dm/dt se considera igual a cero porque se espera que el sistema se encuentre en estado estacionario, \dot{m}_{vent} corresponde al flujo másico del ventilador a la temperatura a la que entre al invernadero, \dot{m}_{extrac} es el flujo másico a la temperatura con la que sale el aire y \dot{m}_{inter} es el flujo másico de intercambio entre el invernadero y los alrededores. Si \dot{m}_{inter} resulta positivo significa que ingresa aire a temperatura ambiente, pero si es negativo significa que se sale el aire a la temperatura promedio del invernadero.

El balance de energía se expresa mediante la ecuación (9).

$$\frac{dq}{dt} = \dot{q}_{vent} - \dot{q}_{extrac} + \dot{q}_{inter} \quad (9)$$

Donde el término dq/dt se considera cero el suponerse un estado estacionario, los valores de \dot{q}_{vent} , \dot{q}_{extrac} y \dot{q}_{inter} se calculan con el calor específico del aire de acuerdo a las ecuaciones (10) y (11).

$$\dot{q} = \dot{m}C_pT \quad (10)$$

$$Cp_{aire} = 1005.2144 + 0.0185T + 0.0004T^2 \quad (11)$$

Donde Cp se da en J/kg K y la temperatura se introduce en Celsius.

Para obtener los valores experimentales es necesario medir la temperatura en cada corriente de aire, por esta razón se requiere un sensor de temperatura en cada extractor, un sensor de temperatura en cada difusor que ingresa aire a los invernaderos y un último sensor ubicado en el centro tridimensional de cada invernadero.

El rendimiento del invernadero se determina mediante la ecuación (12).

$$\eta_{inver} = \frac{\Delta q}{\Sigma GA} \quad (12)$$

Donde el término Δq se obtiene restando el calor de las corrientes de salida menos el calor de las corrientes de entrada y el término ΣGA representa la sumatoria del calor que ingresa por radiación en cada una de las caras del invernadero.

3.5 Rendimiento integral de la planta

De manera general, puede establecerse la energía que aprovecha la planta para su funcionamiento cuantificando el total de energía recibida por los colectores y paneles solares y cuantificando el aprovechamiento térmico y eléctrico. Para lo anterior se establece la ecuación (13).

$$\eta_{planta} = \frac{(\dot{m}CpT)_{amb} + (\dot{m}CpT)_{inter} - (\dot{m}CpT)_{extrac} + (VI)_{vent} + (VI)_{resis} + (VI)_{extrac} + (VI)_{bomba}}{(GA)_{colec} + (GA)_{panel} + (GA)_{inver}} \quad (13)$$

Siendo $(\dot{m}CpT)_{amb}$ la corriente de aire que ingresa por los colectores solares, $(\dot{m}CpT)_{inter}$ la corriente de aire que intercambia el invernadero con el ambiente, $(\dot{m}CpT)_{extrac}$ la corriente de aire que sale por los extractores, $(VI)_{vent}$ la potencia entregada por el ventilador, $(VI)_{resis}$ la potencia entregada por la resistencia eléctrica, $(VI)_{extrac}$ la potencia entregada por los extractores y $(VI)_{bomba}$ la potencia entregada por la bomba de agua ubicada en el tanque, $(GA)_{colec}$ la energía recibida por los colectores de aire, $(GA)_{panel}$ la energía recibida por los paneles fotovoltaicos y $(GA)_{inver}$ la energía recibida por los invernaderos.

4. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se implementan los procedimientos descritos en la sección 3 con el fin de describir los detalles de la evaluación y sentar las bases de la evaluación de futuras plantas de secado. Las pruebas se realizaron durante los meses de marzo y abril del 2024.

4.1 Captadores solares

Para su estudio, se le ha asignado a cada serie de colectores una letra, misma que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Nombre de cada serie de colectores solares.

A continuación, se presenta la Tabla 1 que muestra los valores obtenidos durante la evaluación de las series de colectores. Tomando en cuenta que la temperatura promedio en estas pruebas es de $T_{prom}=62.3^{\circ}\text{C}$, se consideró $C_{p\text{aire}}=1007.13\text{J/kg K}$ y $\rho_{\text{aire}}=1.29\text{ kg/m}^3$.

Tabla 1. Valores obtenidos para la evaluación térmica de los colectores.

Serie	Punto	Hora	T_{ambiente} [°C]	T_{salida} [°C]	V_{aire} [m/s]	A_t [m ²]	G_{prom} [W/m ²]	A_{bruta} [m ²]
A	1	12:33	39.5	73.4	1.36	0.0226	886.4	8.5
A	2	12:43	39.8	77.5	1.16	0.0226	854.5	8.5
A	3	12:53	40.5	74.5	2.11	0.0226	885.1	8.5
B	1	12:33	39.5	62.1	2.58	0.0226	886.4	8.5
B	2	12:43	39.8	68.6	2.29	0.0226	854.5	8.5
B	3	12:53	40.5	65.2	2.28	0.0226	885.1	8.5
C	1	12:33	39.5	67.4	1.01	0.0226	886.4	8.5
C	2	12:43	39.8	70.7	1.09	0.0226	854.5	8.5
C	3	12:53	40.5	68.5	1.32	0.0226	885.1	8.5

4.2 Invernadero

Para evaluar el desempeño térmico de los invernaderos debido a la radiación solar se requiere sumar la aportación en cada lado de los invernaderos.

La Tabla 2 muestra los valores de irradiancia para cada una de las caras en el invernadero chico.

Tabla 2. Valores de irradiancia en invernadero chico.

Hora	Techo		Entrada		Derecha		Fondo		Izquierda	
	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]
12:33	916	24	222	8	188	12	181	8	184	12
12:43	933	24	211	8	191	12	171	8	188	12
12:53	948	24	228	8	220	12	285	8	188	12

La Tabla 3 muestra los valores de irradiancia para cada una de las caras en el invernadero grande.

Tabla 3. Valores de irradiancia en invernadero grande.

Hora	Techo		Entrada		Derecha		Fondo		Izquierda	
	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]	G [W/m ²]	Area [m ²]
12:33	928	54	226	12	216	18	188	12	174	18
12:43	919	54	211	12	225	18	181	12	167	18
12:53	958	54	235	12	278	18	186	12	181	18

Para determinar el calor ganado o perdido en la corriente de aire al interior de los invernaderos se realiza primero un balance de masa, considerando que las entradas de aire son iguales a las salidas.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{vent} - \dot{m}_{extrac} + \dot{m}_{inter} &= 0 \\ \dot{m}_{inter} &= \dot{m}_{extrac} - \dot{m}_{vent} \\ \dot{m}_{inter} &= \dot{V}_{extrac} \rho_{extrac} - \dot{V}_{vent} \rho_{vent} \\ \dot{m}_{inter} &= v_{extrac} A_{t,e} \rho_{extrac} - v_{vent} A_{t,v} \rho_{vent} \end{aligned}$$

Donde \dot{V} es el flujo volumétrico determinado por el producto de la velocidad del aire por el área transversal y la densidad del aire a la temperatura de la corriente. Las tablas 4 y 5 muestra los valores necesarios para determinar la corriente de intercambio y el cálculo de la corriente de intercambio para el invernadero chico.

Tabla 4. Datos de las corrientes del invernadero chico.

Corriente	Ventilador				Extractor			
	v [m/s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	A _t [m ²]	v [m/s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	A _t [m ²]
12:33	2.90	61.9	1.04	0.042	2.69	40.1	1.12	0.21
12:43	3.64	63.4	1.04	0.042	2.53	46.4	1.10	0.21
12:53	3.73	63.4	1.04	0.042	3.04	46.5	1.10	0.21

Tabla 5. Valores de corriente de intercambio en el invernadero chico.

Hora	Intercambio \dot{m}_{inter} [kg/s]
12:33	-0.51
12:43	-0.43
12:53	-0.54

Las tablas 6 y 7 muestran los valores obtenidos para calcular la corriente de intercambio y el cálculo de la corriente de intercambio en el invernadero grande.

Tabla 6. Datos de las corrientes del invernadero grande.

Corriente	Ventilador				Extractor			
	v [m/s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	A _t [m ²]	v [m/s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	A _t [m ²]
Hora								
12:33	2.47	58.5	1.05	0.07	3.70	46.5	1.10	0.26
12:43	2.39	62.8	1.04	0.07	4.30	47.0	1.10	0.26
12:53	3.03	62.9	1.04	0.07	4.33	45.1	1.10	0.26

Tabla 7. Valores de corriente de intercambio en el invernadero grande.

Hora	Intercambio \dot{m}_{inter} [kg/s]
12:33	-0.88
12:43	-1.06
12:53	-1.02

El signo negativo en la corriente de intercambio indica que la corriente de extracción es mayor que la de ingreso (ventilador) y por lo tanto existe una corriente de aire que está ingresando al invernadero por fronteras no selladas como marcos de puerta o unión del piso con la base de las paredes. Por lo anterior, en el balance de energía se considerará una corriente de aire a temperatura ambiente que ingresa al invernadero. Las tablas 8 y 9 muestran el calor de cada corriente de aire en el invernadero.

Tabla 8. Valores para el balance de energía en el invernadero chico.

Corriente	Ventilador			Extractor			Intercambio		
	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]
Hora									
12:33	0.13	61.9	335.1	0.63	40.1	313.3	0.51	39.5	312.7
12:43	0.16	63.4	336.6	0.58	46.4	319.6	0.43	39.8	313.0
12:53	0.16	63.4	336.6	0.70	46.5	319.6	0.54	40.5	313.7

Tabla 9. Valores para el balance de energía en el invernadero grande.

Corriente	Ventilador			Extractor			Intercambio		
	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]	\dot{m}_{inter} [kg/s]	T [°C]	h [kJ/kg]
Hora									
12:33	0.18	58.5	331.7	1.06	46.5	319.7	0.88	39.5	312.7
12:43	0.17	62.8	336.0	1.23	47.0	320.2	1.06	39.8	313.0
12:53	0.22	62.9	336.0	1.24	45.1	318.3	1.02	40.5	313.7

5. RESULTADOS

5.1 Colectores solares

A continuación, se presenta la Tabla 10 con los resultados obtenidos de energía y eficiencia para cada serie de colectores.

Tabla 10. Energía y eficiencia en las series de colectores solares.

Hora	12:33			12:43			12:53		
	\dot{q}_{serie} [W]	\dot{q}_{solar} [W]	η_{serie}	\dot{q}_{serie} [W]	\dot{q}_{solar} [W]	η_{serie}	\dot{q}_{serie} [W]	\dot{q}_{solar} [W]	η_{serie}
A	1350.7	7534.4	0.18	1281.8	7263.3	0.18	2107.4	7523.4	0.28
B	1713.5	7534.4	0.23	1938.2	7263.3	0.27	1648.6	7523.4	0.22
C	827.2	7534.4	0.11	990.7	7263.3	0.14	1081.9	7523.4	0.14

5.2 Invernaderos

Para determinar el rendimiento térmico de los invernaderos se recurrirá a los conceptos principales de eficiencia de sistemas, en donde se evalúa la energía de la corriente principal de salida dividida entre la energía captada. Las energías de infiltraciones por lo general no se consideran por considerarse menores.

De este modo las tablas 11 y 12 muestran los valores de eficiencia obtenidos para los invernaderos chico y grande respectivamente.

Tabla 11. Eficiencia en el invernadero chico.

Hora	\dot{q}_{extrac} [W]	\dot{q}_{rad} [W]	η_{inver} [%]
12:33	9868	50112	19.69
12:43	9950	50998	19.51
12:53	9890	50785	19.47

Tabla 12. Eficiencia en el invernadero grande.

Hora	\dot{q}_{extrac} [W]	\dot{q}_{rad} [W]	η_{inver} [%]
12:33	2516	12668	20.21
12:43	2723	12750	20.51
12:53	2858	12995	21.20

6. CONCLUSIONES

Las eficiencias obtenidas para cada una de las series de colectores se encuentran en un rango que va desde el 11% hasta el 28%. Estas eficiencias son relativamente bajas porque en este modelo de colectores en serie se han obtenido eficiencias por encima del 50%. Para poder incrementar la eficiencia de las series de colectores se sugiere incrementar el flujo de aire del ventilador.

Con base en los resultados obtenidos de la serie de colectores solares y el rendimiento térmico en los invernaderos, se sugiere en un futuro usar un ventilador de mayor potencia para conseguir que el flujo que ingresa a los invernaderos sea similar al del extractor, de esta manera el intercambio entre el aire ambiental y el interior de los invernaderos será de magnitud despreciable.

7. OPORTUNIDADES DE MEJORA

Con el objetivo de considerar el rendimiento de la planta de secado operando en las condiciones que se han sugerido derivado de los resultados obtenidos, se realizará un estudio teórico del rendimiento térmico de la planta de secado.

7.1 Colectores solares

La sugerencia de mejora para la línea de colectores solares fue incrementar el flujo de aire, esto se consigue modificando el control para pasar de 40 a 60Hz. Lo anterior implica realizar una estimación del flujo volumétrico basado en el obtenido a 40Hz y el estimado por el fabricante como flujo nominal de descarga libre a 60Hz que es de $0.708\text{m}^3/\text{s}$.

Tabla 13. Valores obtenidos para la evaluación térmica de los colectores.

Serie	$T_{\text{ambint e}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{salida}} [^{\circ}\text{C}]$	$V_{\text{aire}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$G_{\text{prom}} [\text{W}/\text{m}^2]$	$A_{\text{bruta}} [\text{m}^2]$
A	39.9	75.1	0.035	875.3	8.5
B	39.9	65.3	0.054	875.3	8.5
C	39.9	68.8	0.026	875.3	8.5
		Total	0.115		

De lo anterior se observa que el flujo a 60 Hz debe tener un valor entre 0.115 y $0.708 \text{ m}^3/\text{s}$. Como el valor de $0.708 \text{ m}^3/\text{s}$ es a descarga libre pero se tienen 3 series de colectores, difusores y ductos con codos que aportan caída de presión, una suposición es que el flujo volumétrico a 60 Hz sea de $0.230 \text{ m}^3/\text{s}$. Ahora, si conservamos la proporción en cada serie de colectores, entonces la Tabla 3 se puede reescribir como:

Tabla 14. Valores obtenidos para la evaluación térmica de los colectores.

Serie	T_{ambinte}	T_{salida}	V_{aire}	G_{prom}	A_{bruta}
-------	----------------------	---------------------	-------------------	-------------------	--------------------

	[°C]	[°C]	[m ³ /s]	[W/m ²]	[m ²]
A	39.9	75.1	0.07	875.3	8.5
B	39.9	65.3	0.108	875.3	8.5
C	39.9	68.8	0.052	875.3	8.5

Una vez que se modifica el flujo no se esperaría tener la misma temperatura de salida, así que se debe recalcular, para lo cual se puede usar el modelo establecido por Duffie & Beckman:

$$Q_u = A_{bruta} F_R [S - U_L (T_{prom} - T_{amb})]$$

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{salida} - T_{entrada})$$

Donde F_R es un factor de eficiencia del colector, S es la energía absorbida por el colector por unidad de área, U_L es el coeficiente global de pérdidas del colector y T_{prom} es la temperatura promedio del fluido entre la entrada y la salida, y A_{bruta} es el área de transferencia al ambiente. El procedimiento a seguir es determinar el factor F_R a partir de los resultados obtenidos y posteriormente usando ese valor para predecir la temperatura de salida con el aumento de flujo.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{salida} - T_{entrada})}{A_{bruta} [S - U_L (T_{prom} - T_{amb})]}$$

Usando los valores de $C_p=1007.13$ J/kg K, $T_{entrada}=39.9^\circ\text{C}$, $A_{bruta}=8.5\text{m}^2$, $U_L=5$ W/m², $S=1.05\text{MJ/m}^2$ (para los 20 minutos de la prueba):

Tabla 15. Cálculo de F_R para cada serie de colectores.

Serie	\dot{m} [kg/s]	T_{salida} [°C]	T_{prom} [°C]	F_R
A	0.039	75.1	57.5	0.169
B	0.060	65.3	52.6	0.192
C	0.029	68.8	54.4	0.105

Ahora, a partir del valor F_R para el flujo a 40 Hz y siguiendo el procedimiento de Duffie & Beckman se observa que el valor de F_R incrementa cuando aumenta el flujo másico, por lo que se estudió el incremento de F_R para el nuevo flujo y en promedio incrementaría 0.05. Con este nuevo valor para F_R se calcula la temperatura de salida en cada serie:

Tabla 16. Cálculo de T_{salida} para cada serie de colectores.

Serie	\dot{m} [kg/s]	F_R	T_{salida} [°C]
A	0.078	0.219	60.1
B	0.120	0.242	54.5
C	0.058	0.155	59.1

Y ahora es posible determinar la eficiencia de cada serie de colectores:

Tabla 16. Cálculo de la eficiencia para cada serie de colectores.

Serie	\dot{m}	$T_{entrada}$	T_{salida}	η
-------	-----------	---------------	--------------	--------

	[kg/s]	[°C]	[°C]	
A	0.078	39.9	60.1	0.21
B	0.120	39.9	54.5	0.24
C	0.058	39.9	59.1	0.15

Si los resultados anteriores se comparan con los mostrados en la Tabla 10 se observa un ligero incremento de eficiencia, sin embargo, en cuestiones de flujo se consigue incrementar su velocidad, lo que permitirá mejorar el proceso de secado en los invernaderos.

7.2 Invernaderos

Con respecto a la sugerencia en los invernaderos, la cuál consiste en regular el flujo de aire a la salida para que sea igual al de entrada y así desaparecer la corriente de infiltraciones, se puede proceder con el mismo modelo presentado por Duffie & Beckman modificando el área de incidencia, pues el calor ingresa desde las paredes laterales y el techo:

$$Q_u = \sum G(\tau\alpha)A_i - U_L A_{total}(T_{prom} - T_{amb})$$

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{salida} - T_{entrada})$$

Donde el producto $G(\tau\alpha)A_i$ es la energía que entra en cada cara del invernadero, el valor de A_{total} es la suma de las 5 caras del invernadero que reciben la radiación solar y U_L es el coeficiente global de pérdidas.

El producto $(\tau\alpha)$ cuando el vidrio es la superficie transparente se aproxima a 1.01, sin embargo, como las paredes y el techo son de policarbonato el valor de $(\tau\alpha)$ se estima en 0.9.

Para el coeficiente de pérdidas U_L se puede considerar la ecuación en función de la velocidad del viento, la cual fue en promedio de 2.5m/s:

$$U_L = 5.6 + 3.86v = 5.6 + 3.86(2.5) = 15.25W/m^2K$$

Los valores de A_{total} se obtienen de las Tablas 2 y 3, siendo su valor de 64 m² para el invernadero chico y 114 m² para el invernadero grande.

La sumatoria del producto $G(\tau\alpha)A_i$ también puede obtenerse a partir de las Tablas 2 y 3, siendo lo valores de 26,996 W para el invernadero chico y 55,890 W para el invernadero grande.

El valor del flujo másico se obtiene de la suma de flujo en cada serie, el cuál es igual a 0.256kg/s y en este punto se supondrá que el flujo se divide de manera equitativa para cada invernadero.

Para la temperatura de entrada a los invernaderos se estudia la mezcla de las tres corrientes (el flujo másico en cada serie de colectores) y su entalpía a sus diferentes temperaturas para obtener una corriente de salida y estimar la temperatura:

$$\dot{m}_T \hat{H} = \dot{m}_A \hat{H}_A + \dot{m}_B \hat{H}_B + \dot{m}_C \hat{H}_C$$

Después de revisar las propiedades termodinámicas del aire se determinó que la temperatura resultante de la mezcla será de 57.2°C, que es considerada como T_{entrada} en cada invernadero.

Ahora es posible estimar la temperatura a la salida si se igualan las ecuaciones de calor (Q_u) y se despeja el valor de T_{salida} :

$$T_{\text{salida}} = \frac{2 \sum G(\tau\alpha)A_i + 2A_{\text{total}}U_L T_{\text{amb}} - 2A_{\text{total}}U_L T_{\text{entrada}} + 2\dot{m}C_p T_{\text{entrada}}}{2\dot{m}C_p + A_{\text{total}}U_L}$$

Así, los valores de temperatura de salida para cada invernadero serán de 73.6 °C en el invernadero chico y 83.1 °C en el invernadero grande. Considerando un $C_p=1007.13 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ y con los resultados anteriores es posible determinar la eficiencia en los invernaderos mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}})}{\sum GA_i}$$

El valor de $\sum GA_i$ se determina a partir de los datos mostrados en las tablas 2 y 3.

$$\eta_{\text{chico}} = \frac{\left(0.63 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(1007.13 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) (73.6^\circ\text{C} - 57.2^\circ\text{C})}{29,996 \text{ W}} = 0.35$$

$$\eta_{\text{grande}} = \frac{\left(0.63 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(1007.13 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) (83.1^\circ\text{C} - 57.2^\circ\text{C})}{62,100 \text{ W}} = 0.26$$

Tabla 17. Eficiencias en los invernaderos.

Invernadero	\dot{m} [kg/s]	T_{entrada} [°C]	T_{salida} [°C]	$\sum GA_i$ [W]	η_{inver}
Chico	0.128	57.2	73.6	29996	0.35
Grande	0.128	57.2	83.1	62100	0.26

De esta manera los invernaderos lograrían incrementar la temperatura del aire y tendrían eficiencias del 35 % para el invernadero chico y 26 % para el invernadero grande.

Es importante mencionar que para el cálculo de la eficiencia se consideró el calor útil para calentar el aire, sin embargo, no se está tomando en cuenta el calor útil para evaporar el agua de los alimentos. Para determinar este valor se tendría

que medir el porcentaje humedad relativa de entrada y de salida de los invernaderos, después establecer la diferencia de humedades absolutas de salida menos la de entrada y determinar la cantidad de agua que se incorporó al aire, luego, considerando que al alimento no cambia su temperatura durante el periodo de tiempo seleccionado, se consideraría únicamente el calor latente del agua. Considerar éste calor útil en la ecuación de eficiencia aportaría un incremento significativo a los valores obtenidos hasta ahora.

8. REFERENCIAS

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). Solar engineering of thermal processes (p. 16591). New York: Wiley.
- ISO9806:2017. (2017). International standard ISO9806:2017 Solar energy - solar thermal collectors - test methods.
- NMX-ES-001-NORMEX-2005. (2005). Energía solar - Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua - Métodos de prueba.
- Çengel, Y. A. (2019). Termodinámica. Mc Graw Hill.

ANEXO: DISEÑO Y PLANOS DE LA PLANTA DE SECADO SOLAR

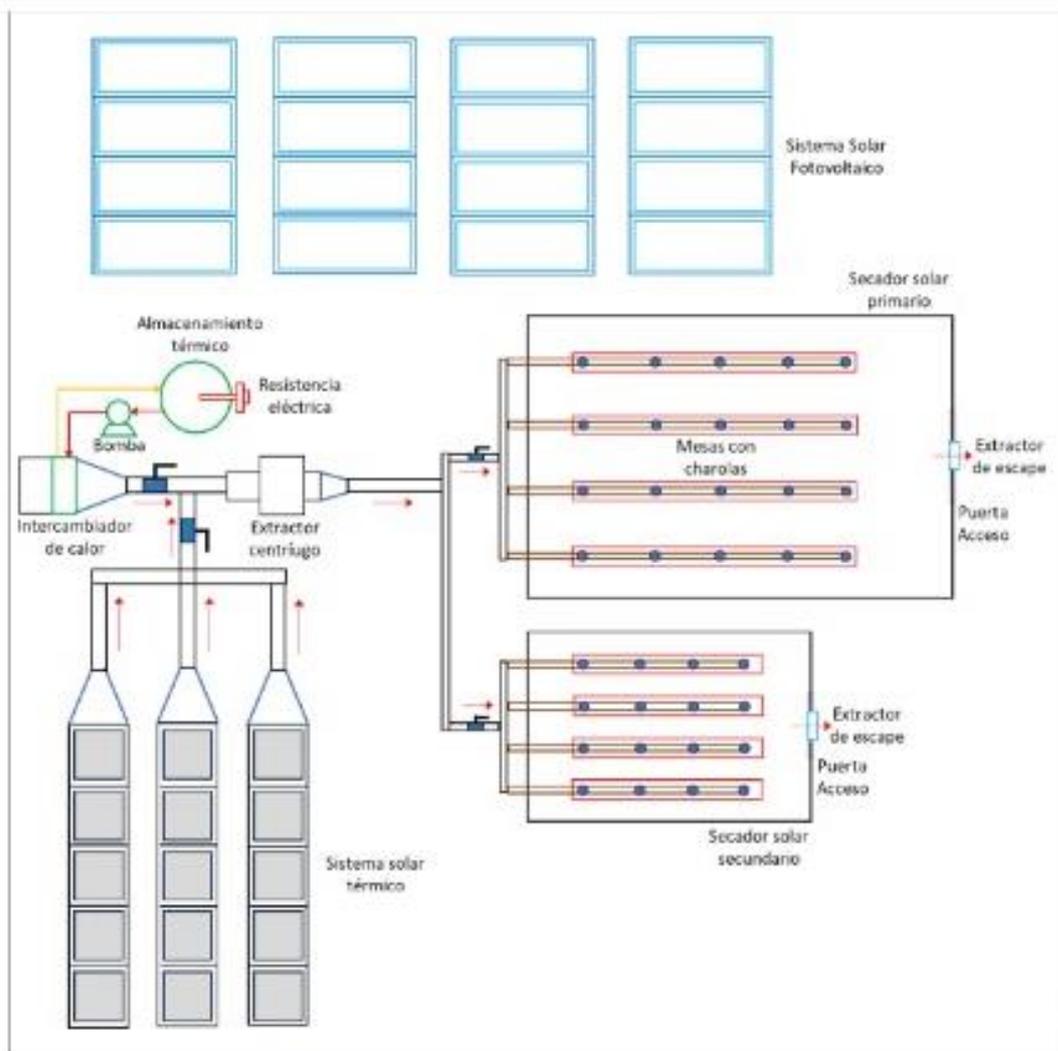


Figura 1 Diseño esquemático de los secadores de la planta de secado solar para productos pesqueros.

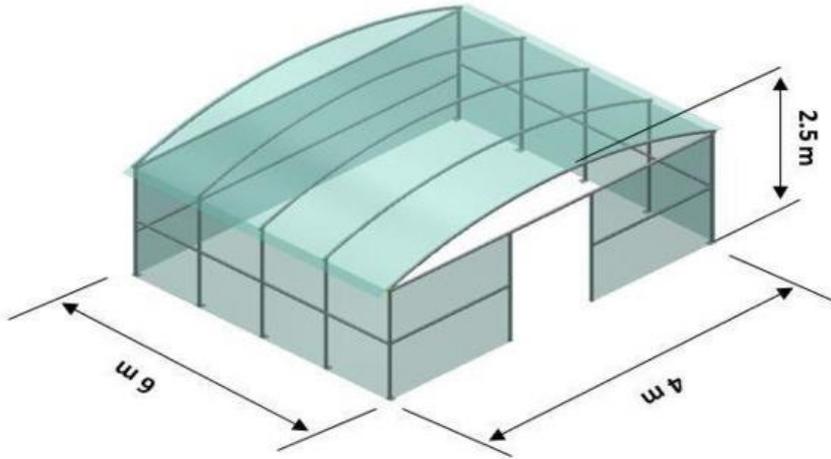


Figura 2. Diseño y dimensiones del secador solar secundario para el deshidratado de sub-productos pesqueros (visceras, piel, etc.)

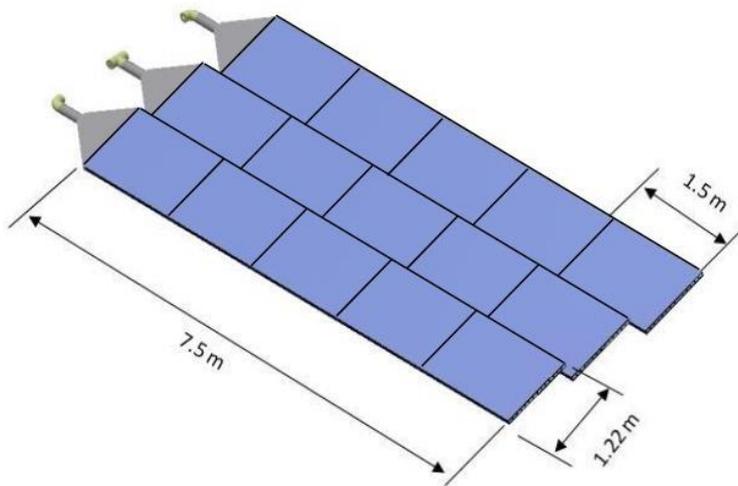


Figura 3. Sistema de solar térmico para el calentamiento del aire

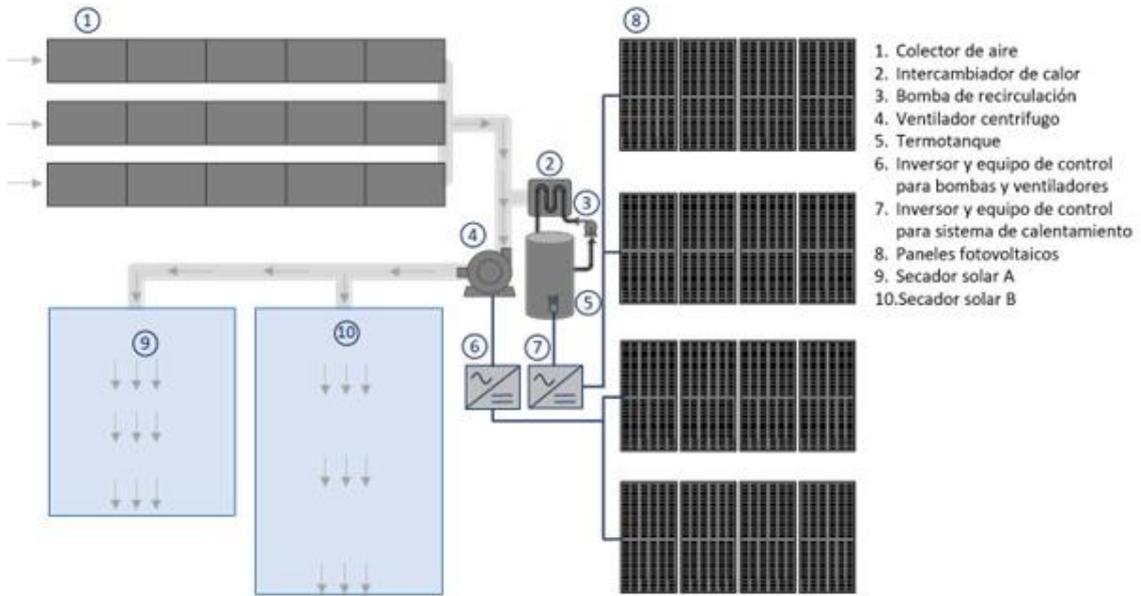


Figura 4 Diseño esquemático de los componentes de la planta de secado solar para productos pesqueros.

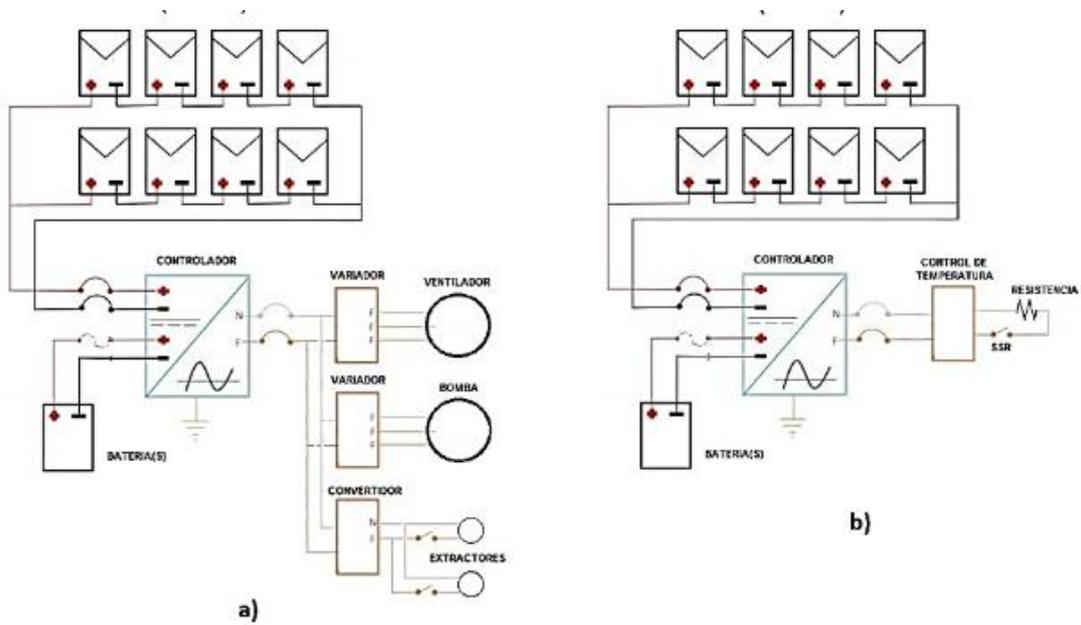
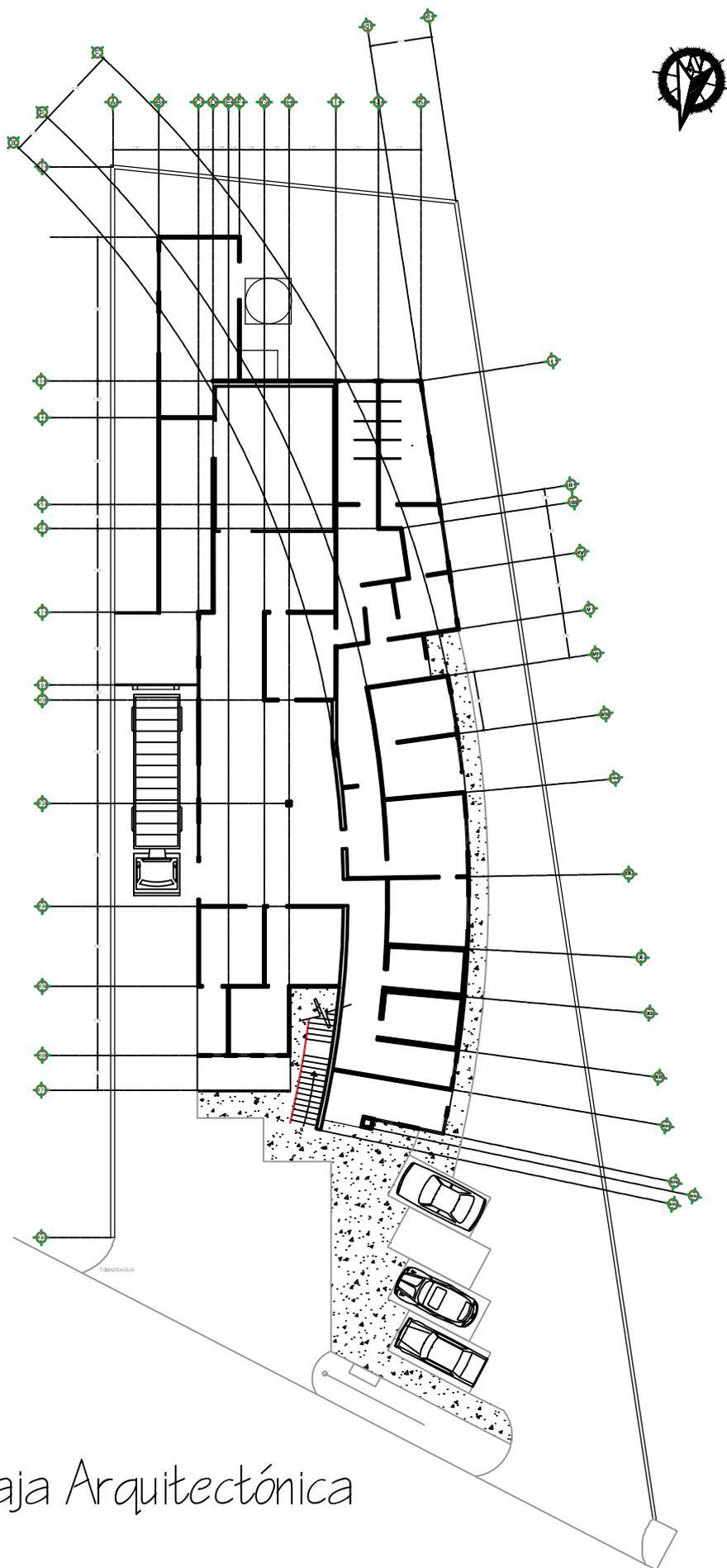


Figura 5. Arreglo de las dos secciones del sistema solar fotovoltaico a) sección uno de 2.8 kW y b) sección dos de 3 kW de potencia nominal.



Planta Baja Arquitectónica
(actual)

Figura 6. Planta baja Arquitectónica actual de la nave industrial

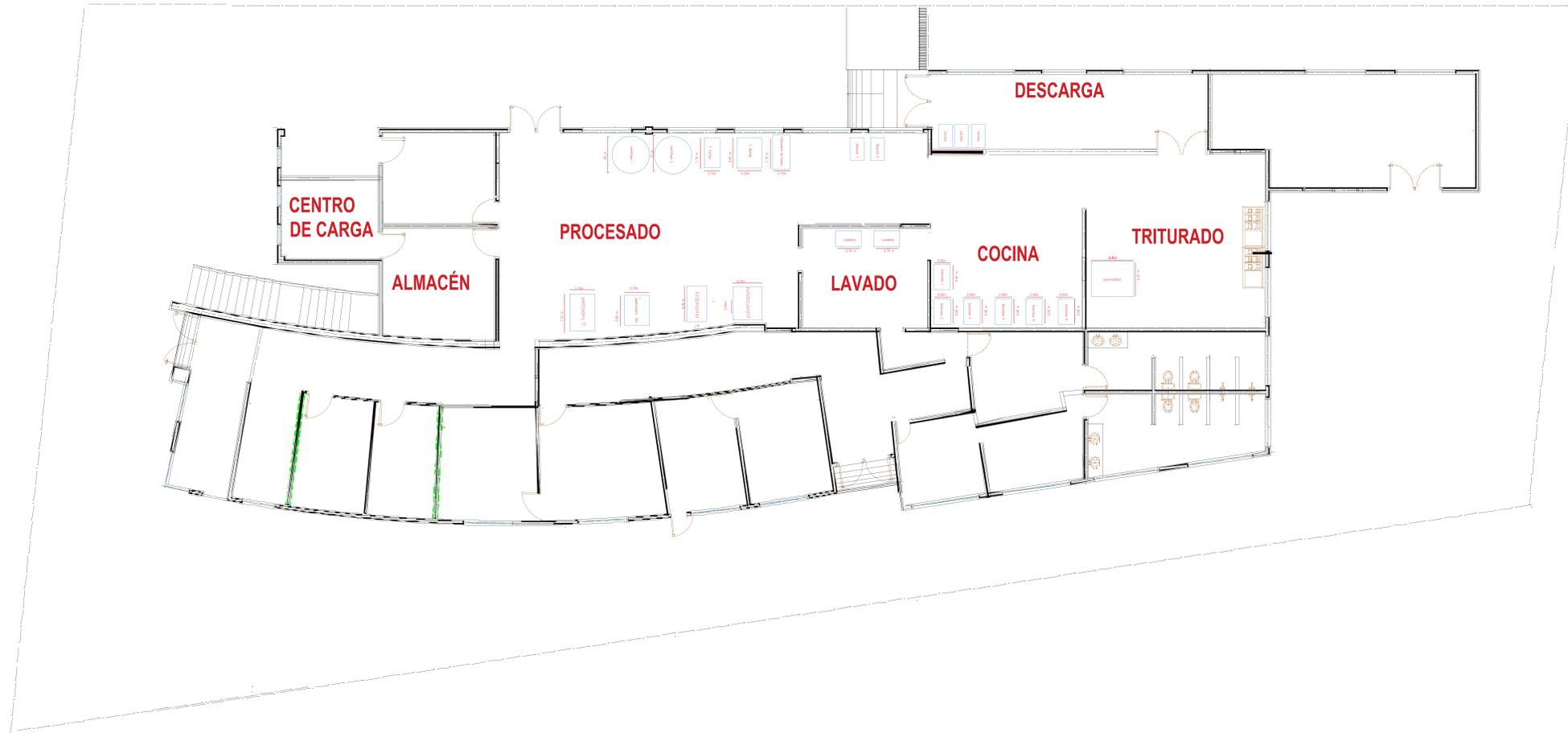


Figura 7. Planos de ubicación de maquinaria

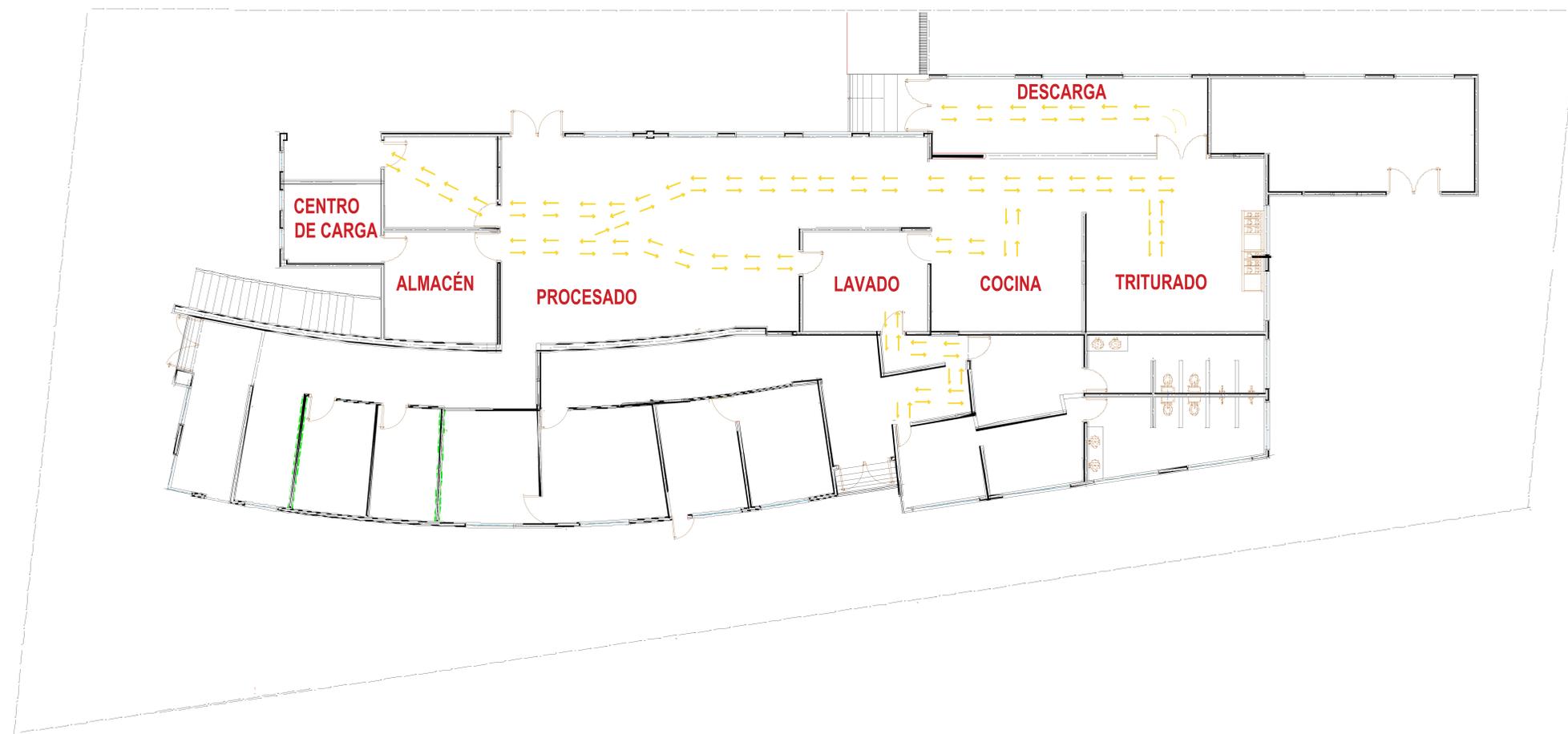


Figura 8. Planos de ubicación de movimiento

SIMBOLOGIA ELECTRICA	
	CENTRO DE CARGA TIPO Q0-12 INTERRUPTORES
	APAGADOR SENCILLO 10 a/120 v
	APAGADOR ESCALERA 10 a/127 v
	CONTACTO DUPLEX POLARIZADO 15 a/120v
	Tubería Sube
	Tubería Baja
	Caja de registro
	Lampara
	TUBO INST. ELECTRICA 1/2 in para 127v (luminaria)
	TUBO INST. ELECTRICA 3/4 in para 127v(contactos)
	TUBO INST. ELECTRICA 3/4 in para 220v(contactos)
	TUBO INST. ELECTRICA 1 1/4 in para 127v(distribucion)
	TUBO INST. ELECTRICA 1 1/2 in para 127v(distribucion)

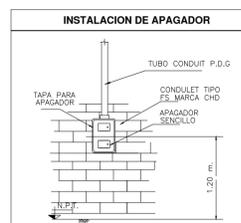
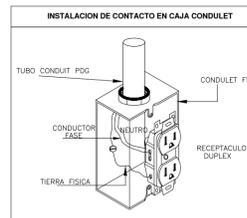
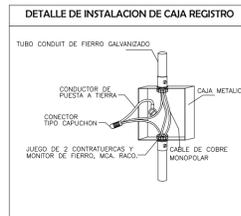
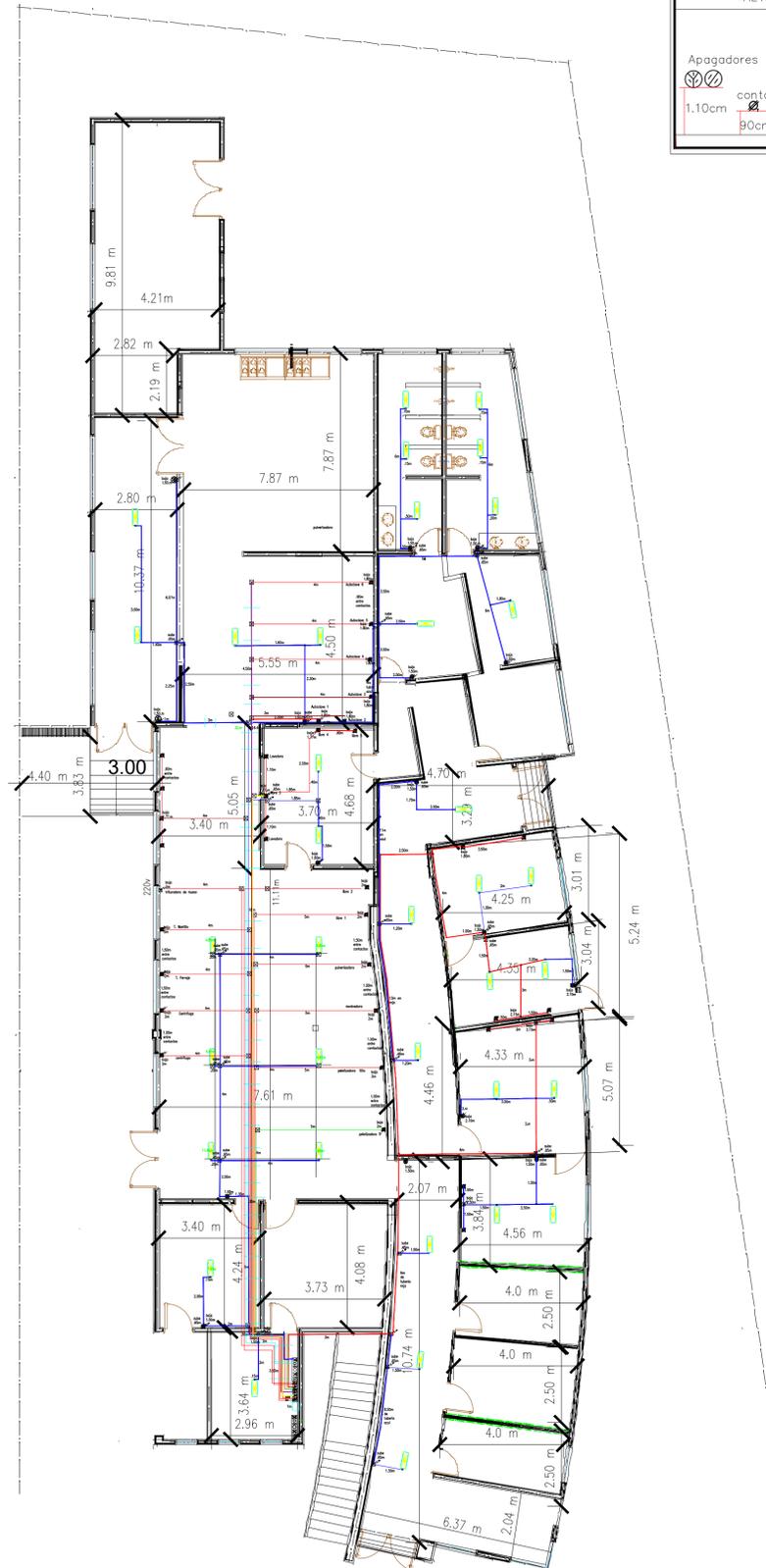
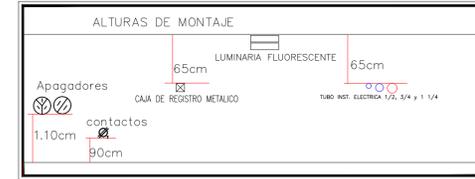


Figura 9. Planos de levantamiento eléctrico