



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
SECRETARÍA ACADÉMICA  
MAESTRÍA EN ESTUDIOS TRANSDISCIPLINARES EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**CUN/SAC/METC/064/2024**

**Dra. Beatriz Castillo Tellez**  
Profesora e Investigadora  
Núcleo Académico Básico de la METCyT

**PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para informarle que se ha recibido el documento recepcional de la alumna **María Castañeda Grano**, titulado "Construcción, Instrumentación y Control de un Secador Solar para Productos Marinos", para obtener el grado de Maestra en Estudios Transdisciplinares en Ciencia y Tecnología.

En seguimiento a su trámite de titulación, le informo que la Coordinación del programa ha aprobado el expediente de egreso de la alumna, confirmando que cumple con todos los requisitos del plan de estudios y que no cuenta con adeudos. Por lo tanto, se determina que es apta para presentar su examen de grado según se establece en el Reglamento General de Posgrado de la Universidad de Guadalajara, en su Artículo 53.

En los consiguiente, la Junta Académica, valora la información y asigna los lectores para el trabajo recepcional, quienes, en un plazo de 10 días naturales a partir de la fecha de recepción del documento, deberán entregar los resultados de la evaluación a la Coordinación del Posgrado.

Una vez recibidos los resultados de la evaluación, se otorgará a la alumna una semana para realizar las correcciones pertinentes y obtener la autorización de impresión del documento recepcional.

Con base en lo anterior, se establece como fecha tentativa para la realización del examen de grado el día **4 de noviembre de 2024**, a menos que surjan condiciones adversas que lo impidan.

Es importante destacar que el análisis de plagio en Turnitin del documento recepcional arrojó un resultado del **22%**, lo cual cumple con los criterios de calidad solicitados por el programa de posgrado. Finalmente, me gustaría extender una felicitación a usted y a la alumna por el logro alcanzado y el empeño demostrado durante sus estudios de posgrado.

**"Piensa y Trabaja"**  
**"30 años de la Autonomía de la Universidad de Guadalajara**  
**y de organización en Red"**

Colotlán, Jalisco, a 07 de octubre de 2024

**Dra. Martha Fabiola Martin del Campo Solís**  
Coordinadora de la Maestría en Estudios  
Transdisciplinares en Ciencia y Tecnología



**CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE**  
Coordinación de la Maestría en Estudios  
Transdisciplinares en Ciencia  
y Tecnología

C.c.p. Archivo

# **UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

## **CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE**

### **MAESTRÍA EN ESTUDIOS TRANSDISCIPLINARES EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**



### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SECADOR SOLAR PARA PRODUCTOS MARINOS**

### **TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN ESTUDIOS TRANSDISCIPLINARES EN CIECIA Y TECNOLOGÍA**

**P R E S E N T A**

**IEM. MARÍA CASTAÑEDA GRANO**

Director: Dra. Beatriz Castillo Téllez

Codirector: Dra. Margarita Castillo Téllez

Asesor: Dr. Juan Carlos Percino Picazo

COLOTLÁN, JALISCO

OCTUBRE, 2024

## ÍNDICE GENERAL

|       |                                                            |    |
|-------|------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....                                         | 12 |
| 1.1   | ANTECEDENTES.....                                          | 20 |
| 1.2   | MARCO TEÓRICO .....                                        | 25 |
| 1.2.1 | Breve Historia del Secado como Método de Conservación..... | 25 |
| 1.2.2 | Importancia del Secado Solar en el Contexto Actual.....    | 26 |
| 1.2.3 | Deshidratado o secado.....                                 | 29 |
| 1.2.4 | Eólica.....                                                | 30 |
| 1.2.5 | Biomasa .....                                              | 30 |
| 1.2.6 | Geotermia.....                                             | 31 |
| 1.2.7 | Mareomotriz .....                                          | 31 |
| 1.3   | ENERGÍA SOLAR .....                                        | 32 |
| 1.4   | El Secado solar .....                                      | 33 |
| 1.4.1 | Secadores Solares Pasivos.....                             | 34 |
| 1.4.2 | Secadores Solares Activos.....                             | 34 |
| 1.4.3 | Secadores Solares Directos .....                           | 34 |
| 1.4.4 | Secadores Solares Indirectos.....                          | 35 |
| 1.4.5 | Secadores Solares Mixtos .....                             | 35 |
| 1.4.6 | Secadores Solares Tipo Invernadero .....                   | 35 |
| 1.5   | TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA.....                              | 46 |

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 1.5.1 | Colectores Solares, Tipos y Funcionamiento .....       | 47 |
| 1.5.2 | Tipos de Colectores Solares .....                      | 47 |
| 1.5.3 | Funcionamiento .....                                   | 47 |
| 1.5.4 | Colector Solar de Aire .....                           | 51 |
| 1.6   | IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE SECADORES SOLARES .....      | 52 |
| 1.6.1 | Parámetros de Diseño .....                             | 52 |
| 1.6.2 | Aire .....                                             | 53 |
| 1.6.3 | Humedad .....                                          | 54 |
| 1.6.4 | Temperatura .....                                      | 54 |
| 1.6.5 | Color .....                                            | 55 |
| 1.6.6 | Material .....                                         | 55 |
| 1.6.7 | Producción Mundial de Pesca y Acuicultura .....        | 64 |
| 1.6.8 | Producción en México de Pesca y Acuicultura .....      | 65 |
| 1.6.9 | Aprovechamiento para Otras Aplicaciones .....          | 66 |
| 1.7   | PROBLEMÁTICA DE LA INSEGURIDAD ALIMENTARIA EN EL MUNDO |    |
|       | 67                                                     |    |
| 1.7.1 | Escala de Seguridad Alimentaria .....                  | 68 |
| 1.8   | ESTRUCTURA DE LA TESIS .....                           | 72 |
| 2     | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                       | 73 |
| 2.1   | JUSTIFICACIÓN .....                                    | 74 |

|        |                                                         |    |
|--------|---------------------------------------------------------|----|
| 3      | HIPÓTESIS .....                                         | 74 |
| 4      | OBJETIVO GENERAL.....                                   | 75 |
| 4.1    | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                             | 75 |
| 5      | MATERIALES Y MÉTODOS .....                              | 76 |
| 5.1    | ETAPA DE DISEÑO .....                                   | 76 |
| 5.1.1  | Definición de Requerimientos del Secador Solar .....    | 76 |
| 5.1.2  | Análisis de Transferencia de Calor y Energía .....      | 80 |
| 5.1.3  | Generación de Bocetos y Planos del Prototipo .....      | 83 |
| 5.1.4  | Diseño del Sistema de Flujo de Aire.....                | 84 |
| 5.2    | Descripción Detallada del Proceso de Construcción ..... | 84 |
| 5.2.1  | Selección de Materiales .....                           | 85 |
| 5.2.2  | Preparación y Corte de Componentes .....                | 85 |
| 5.2.3  | Ensamblaje de la Estructura.....                        | 86 |
| 5.2.4  | Integración de la Cámara de Secado .....                | 89 |
| 5.2.5  | Selección de ventilador .....                           | 89 |
| 5.2.6  | Métodos de Medición y Control .....                     | 89 |
| 5.2.7  | Sensores de Temperatura.....                            | 90 |
| 5.2.8  | Sensores de Humedad Relativa.....                       | 90 |
| 5.2.9  | Control y Monitoreo con Arduino .....                   | 91 |
| 5.2.10 | Validación de los Instrumentos.....                     | 92 |

|        |                                                           |     |
|--------|-----------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.11 | Protocolo Experimental .....                              | 92  |
| 6      | RESULTADOS .....                                          | 95  |
| 6.1    | CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR.....                       | 96  |
| 6.2    | INSTRUMENTACIÓN DEL SECADOR SOLAR .....                   | 100 |
| 6.3    | CLIMATOLOGÍA.....                                         | 106 |
| 6.4    | COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SECADOR SOLAR MIXTO ...        | 109 |
| 6.5    | SECADO DE FÍLETE DE CAZÓN EN SECADOR SOLAR MIXTO ....     | 112 |
| 6.6    | SECADO SOLAR DE CAMARÓN EN UN SECADOR SOLAR MIXTO<br>120  |     |
| 6.7    | DESECHOS DE PESCADOS Y MARISCOS .....                     | 126 |
| 6.8    | ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SECADOR.....                   | 131 |
| 6.8.1  | Comparación de Energía Generada y Energía Necesaria ..... | 131 |
| 6.8.2  | Análisis de Eficiencia Energética.....                    | 131 |
| 7      | DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                             | 133 |
| 8      | CONCLUSIONES.....                                         | 134 |
| 9      | BIBLIOGRAFÍA .....                                        | 136 |
| 10     | ANEXOS .....                                              | 145 |
| 10.1   | ANEXO I.....                                              | 145 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Matriz de síntesis de revisión de literatura de secado solar de productos marinos ..... | 18 |
| Tabla 2. Características de los materiales constructivos. ....                                   | 89 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Producción mundial de pesca de captura y de acuicultura. Tomado de Un futuro de océanos desiertos: pesca, acuicultura y cambio climático. .... | 15  |
| Figura 2. Mapa General del Estado de Jalisco, 2012. Fuente: Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco.....                 | 79  |
| Figura 3. Base metálica que soporta al colector del secador solar. Elaboración propia.....                                                               | 86  |
| Figura 4. Base metálica completa del secador solar y cámara de secado. Elaboración propia.....                                                           | 87  |
| Figura 5. Hoja metálica calibre 14. y Charolas terminadas. Elaboración propia .                                                                          | 87  |
| Figura 6. Charolas dentro de la cámara de secado. Elaboración propia. ....                                                                               | 88  |
| Figura 7. Colector solar utilizado.....                                                                                                                  | 88  |
| Figura 8. Secador solar terminado, con el equipo de trabajo.....                                                                                         | 98  |
| Figura 9. Fotografías ilustrativas del secador solar.....                                                                                                | 99  |
| Figura 10. Tomas laterales del secador solar terminado. ....                                                                                             | 100 |
| Figura 11. Conexión a la placa Arduino de los sensores LM35 y DHT11. Elaboración propia. ....                                                            | 101 |
| Figura 12. Conexión a la placa Arduino nano de los sensores LM35 y DHT22 y pantalla LCD. Elaboración propia. ....                                        | 101 |
| Figura 13. Módulo HX711 y sensor de peso. Elaboración propia. ....                                                                                       | 102 |
| Figura 14. Conexión del sensor de peso. Elaboración propia.....                                                                                          | 102 |
| Figura 15. Sensor de color TCS3200. Elaboración propia.....                                                                                              | 103 |
| Figura 16. Conexión del ventilador al Arduino uno. Elaboración propia.....                                                                               | 103 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 17. Diseño electrónico de la instrumentación del secador solar en Proteus.<br>Elaboración propia. ....                        | 104 |
| Figura 18. PCB en tres dimensiones. Elaboración propia.....                                                                          | 104 |
| Figura 19. Placa de circuito impreso. Elaboración propia. ....                                                                       | 105 |
| Figura 20. Montaje de componentes electrónicos en la placa de circuito impreso.<br>Elaboración propia. ....                          | 105 |
| Figura 21. Diseño final de la placa de circuito impreso a la cual se conectan los<br>sensores. Elaboración propia.....               | 106 |
| Figura 22. Comportamiento climático de un día de prueba tomado como ejemplo,<br>durante la experimentación. Elaboración propia. .... | 108 |
| Figura 23. Distribución de perfiles para toma de temperaturas en la cámara de<br>secado. Elaboración propia. ....                    | 110 |
| Figura 24. Temperaturas registradas en diferentes puntos de la cámara de<br>secado. Elaboración propia. ....                         | 111 |
| Figura 25. Colocación del sistema de adquisición de datos en el secador solar<br>mixto. ....                                         | 112 |
| Figura 26. Variación de peso en función del tiempo en la muestra de filete de<br>cazón. ....                                         | 117 |
| Figura 27. Contenido de humedad vs Tiempo en la muestra de filete de cazón.<br>Elaboración propia.....                               | 118 |
| Figura 28. Curva de secado Humedad libre vs Tiempo. Elaboración propia. ...                                                          | 118 |
| Figura 29. Curva de Velocidad de secado vs Tiempo. Elaboración propia.....                                                           | 119 |

|                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 30. Variación de peso en función del tiempo en la muestra de camarón.<br>Elaboración propia. ....                                                                                                                            | 120 |
| Figura 31. Contenido de humedad vs Tiempo de secado en la muestra de<br>camarón. Elaboración propia. ....                                                                                                                           | 123 |
| Figura 32. Humedad libre vs Tiempo de secado en la muestra de camarón.<br>Elaboración propia. ....                                                                                                                                  | 124 |
| Figura 33. Velocidad de secado vs Tiempo de secado de la muestra de camarón.<br>Elaboración propia.....                                                                                                                             | 126 |
| Figura 34. Pérdida de peso en función del tiempo del secado de residuos de<br>pescado. Elaboración propia .....                                                                                                                     | 129 |
| Figura 35. Contenido de humedad vs Tiempo en las muestras de residuos de<br>pescado. Elaboración propia .....                                                                                                                       | 130 |
| Figura 36. Bosquejo inicial del secador solar. Elaboración propia.....                                                                                                                                                              | 145 |
| Figura 37. Bosquejo inicial de la cámara de secado. Elaboración propia.....                                                                                                                                                         | 146 |
| Figura 38. Dimensiones y materiales del prototipo. ....                                                                                                                                                                             | 147 |
| Figura 39. Vista lateral del prototipo. Elaboración propia.....                                                                                                                                                                     | 148 |
| Figura 40. Estructura metálica del diseño en la cual se muestra la vista de la<br>planta, la vista trasera, la vista lateral y la vista frontal, con sus respectivas<br>dimensiones y simbología utilizada. Elaboración propia..... | 149 |
| Figura 41. Vistas de la planta, lateral, trasera y frontal de la chimenea y del dren<br>de alveolos. Elaboración propia.....                                                                                                        | 150 |
| Figura 42. Vistas lateral y colector planta, hoja de policarbonato, marco colector<br>planta y alveolos. Elaboración propia .....                                                                                                   | 151 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 43. Policarbonato frontal, trasero y lateral del secador solar. Elaboración propia.....                                      | 152 |
| Figura 44. Solera de soporte para el colector y ángulo de anclaje del colector a base metálica. Elaboración propia.....             | 153 |
| Figura 45. Ángulo de soporte para las charolas en la cámara de secado y estructura interna de los alveolos. Elaboración propia..... | 154 |

## ACRÓNIMOS

| Acrónimos  |                                                                           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|
| kwh        | Kilo watt hora                                                            |
| NOM        | Norma oficial mexicana                                                    |
| Ca         | Calcio                                                                    |
| Mg         | Magnesio                                                                  |
| P          | Fósforo                                                                   |
| N          | Nitrógeno                                                                 |
| K          | Potasio                                                                   |
| FAO        | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| DHA        | Ácido docosahexaenoico                                                    |
| FIES       | Escala de seguridad alimentaria                                           |
| ONU        | Organización mundial de las Naciones Unidas                               |
| CONEVAL    | Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social        |
| INEGI      | Instituto Nacional de Estadística y Geografía                             |
| IRENA      | Agencia Internacional de Energías Renovables                              |
| DSP        | Secadores solares directos                                                |
| ISD        | Secadores solares indirectos                                              |
| Aw         | Actividad del agua                                                        |
| Q          | Velocidad de transmisión de calor                                         |
| hs         | Coeficiente de convección                                                 |
| A          | Área en la cual tiene lugar el flujo de calor                             |
| Tg         | Temperatura del aire                                                      |
| Tsup       | Temperatura de la superficie del producto a secar                         |
| ms         | Masa de sólido seco                                                       |
| mh         | Masa de sólido húmedo                                                     |
| Xbh        | Humedad en base húmeda                                                    |
| Xbs        | Humedad en base seca                                                      |
| R          | Velocidad de secado                                                       |
| A          | Área de transferencia                                                     |
| $\Delta X$ | Diferencial de masa de agua/masa seca                                     |
| $\Delta t$ | Diferencial del tiempo                                                    |
| HDPE       | Polietileno de alta densidad                                              |
| PPS        | Sulfuro de polietileno                                                    |
| PTR        | Perfil tubular rectangular                                                |

## **1 INTRODUCCIÓN**

Desde nuestros antepasados hasta nuestros días la conservación de alimentos ha sido una práctica importante en el mundo y en nuestro país. Esta actividad se realiza para conservar los alimentos en tiempos de escasez, para aprovechar grandes cantidades de alimentos que, de otra forma, entrarían en estado de descomposición en un periodo de tiempo corto, para garantizar su inocuidad y calidad o simplemente para recurrir a ellos como una alternativa de consumo saludable, nutritiva y económica (1).

La conservación de alimentos se ha realizado a través de diferentes técnicas, como lo es la refrigeración, congelación, salado, ahumado, secado, encurtido, fermentación, conservación al vacío, liofilización, conservación al vacío, entre otras (2). Los métodos de conservación se han aplicado dependiendo del propósito, tipo de producto a conservar, materiales y tecnologías disponibles. Las propias características del método de conservación determinan los elementos necesarios requeridos para aplicar el método, la tecnología necesaria, el tiempo que garantizan la conservación del producto, así como el consumo energético.

El secado solar ha sido uno de los métodos naturales de conservación más usados por excelencia. Su aplicación original se ha llevado a cabo mediante la exposición directa de los rayos del sol y a cielo abierto, aprovechándose en una gran variedad de frutas, verduras, granos, legumbres, carnes entre otros (3).

Existen diversas ventajas del secado solar, entre las que destacan (1):

1. Bajo costo. Al exponerse los productos a los rayos directos del sol, no consume combustible ni se requieren grandes cantidades de inversión para instrumentos, herramientas o infraestructura.
2. Fácil implementación. En la mayoría de los casos no se requiere, más que el tendido de los productos expuestos a los rayos directos del sol.
3. Ecológico. Al no requerir de combustibles fósiles, el proceso es limpio y no genera contaminación.
4. Escalabilidad. Se puede aplicar a cualquier escala, desde pequeñas cantidades, hasta grandes cantidades.
5. Preservación de propiedades nutritivas. Al realizarse a temperaturas relativamente bajas y de forma lenta y gradual, en la gran mayoría de los casos se conserva un porcentaje elevado de sus propiedades.

Adicionalmente, se pueden mencionar otras ventajas entre las cuales podemos destacar la prolongación de la vida útil de los productos, reducción de peso y volumen, transporte y almacenamiento del producto a temperatura ambiente, asimismo, al aprovechar productos perecederos que son susceptibles de descomposición, se reduce la cantidad de generación de residuos, finalmente, el proceso de secado genera un valor agregado para los productos que tienen un proceso de secado.

Aunado a los argumentos mencionados, la conservación de alimentos juega un papel importante sobre la seguridad alimentaria. Aunque en el mundo se produce suficiente cantidad de alimentos, casi mil millones de personas en el planeta sufre hambre y desnutrición. Muchos países desarrollados desperdician toneladas de productos que podrían consumirse en los países en desarrollo. Estos alimentos se desechan, aunque todavía sean inocuos y de buena calidad (4). El desperdicio de alimentos está asociado con la demanda, lo que conduce a un aumento en el

nivel de precios de las reservas de alimentos. Como resultado, las personas con ingresos menores son las más afectadas al no poder acceder a la alimentación de canasta básica (5).

Asimismo, los alimentos desechados se descomponen, produciendo gas metano nocivo que se escapa a la atmósfera. A nivel mundial, el gas procedente de vertederos de alimentos supone el 7% del total emisiones de gases de efecto invernadero (6). Otro tema relevante derivado de la falta de conservación y aplicación correcta de conservación de alimentos es que, la inocuidad y seguridad de los productos se ve comprometida, dando lugar a la contaminación o proliferación de bacterias y hongos entre otros.

En el siglo actual, uno de los sectores que ha contribuido de forma esencial para la nutrición y seguridad alimentaria a nivel mundial es la pesca y la acuicultura. Según datos proporcionados por el comité de pesca de la FAO, en el año 2020 la pesca de captura aportó 90 millones de toneladas, mientras que la acuicultura generó 88 millones de toneladas, estos datos se pueden observar en la Figura 1 (7).

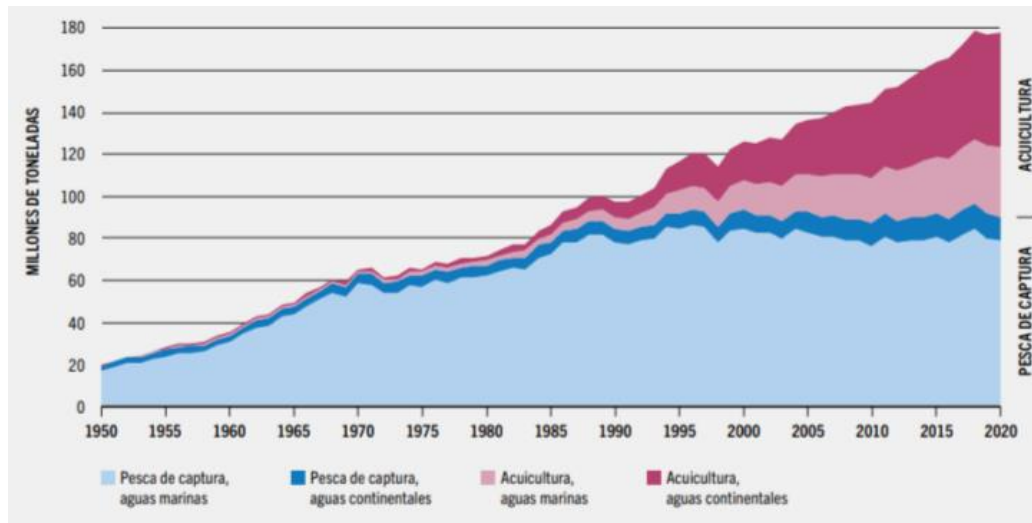


Figura 1. Producción mundial de pesca de captura y de acuicultura. Tomado de *Un futuro de océanos desiertos: pesca, acuicultura y cambio climático*.

Considerando la producción total de los productos acuáticos, el 89% de estos se utilizaron para el consumo humano, lo que rebasó la cantidad de 157 millones de toneladas, mientras que las toneladas restantes, es decir 20 millones, fueron destinadas para la elaboración de aceite y harina de pescado (8). Esto nos da una idea del beneficio que se puede obtener al mejorar cualquier parte del proceso por mínimo que sea.

Actualmente, la conservación de productos marinos se realiza a través de técnicas de refrigeración y congelación, siendo un método bastante efectivo para la conservación. Sin embargo, la refrigeración y congelación conllevan desventajas, por ejemplo, la infraestructura requerida precisa de inversiones significativas y superiores a las requeridas para realizar secado solar, no obstante, el consumo energético es lo que representa un mayor gasto en comparación con el requerido en el secado solar. En cualquier caso, muchas veces el problema es que no se cuenta con la disponibilidad tanto de infraestructura como de suministro eléctrico. Finalmente, la industria pesquera produce residuos derivados de sus propios

procesos que, son susceptibles de aprovechamiento, sin embargo, el costo de procesamiento hace poco atractivo aprovechar los residuos, de tal forma que es más económicos desecharlos, dando como resultado una fuente de contaminación (9).

Por las razones expuestas es importante desarrollar e implementar técnicas de conservación alternativas como el secado solar, enfocadas a minimizar el desperdicio de alimentos perecederos, en particular de productos pequeños. Contribuir a la mitigación del hambre, mejorar la calidad de la alimentación de la población más desfavorecida. Ofrecer alternativas de conservación de alimentos y perecederos para regiones de difícil acceso a la tecnología y/o carentes de servicio eléctrico. Proveer de productos y procesos que garanticen la inocuidad y calidad de perecederos, en particular de productos marinos.

En la literatura se han encontrado estudios diversos de secadores solares, evaluando el comportamiento de materiales constructivos, principios de funcionamiento, comparación de tipos de secadores solares (10) (11) (12) (13). Los productos sometidos al secado solar han sido diversos, como el chile habanero, productos cítricos algarroba, nuez, manzana, entre otros (14), asimismo se han estudiado modelos matemáticos y softwares de simulación para entender y explicar el comportamiento térmico, de secado y eficiencia de los secadores solares (15).

En la Tabla 1 se muestra una matriz de síntesis de la revisión de la literatura del secado solar aplicado a productos marinos. Se puede observar que algunos de los trabajos más relevantes son alrededor del año 2000, sin embargo, el estudio

del secado solar aplicado a productos marinos ha continuado hasta nuestros días. Se observa que los tipos de secadores solares que se han usado son variados, desde secadores solares pasivos, hasta secadores solares tipo invernadero con ventilación forzada. Se han realizado estudios teóricos, de simulación y experimentales. Asimismo, el tipo de pescado usado ha sido variado, desde pescado de captura, pescado de agua dulce, así como camarón. Se encontró también que, el interés de los estudios se enfoca en el desempeño de los secadores solares, y en mayor medida en la cinética de secado y el comportamiento de secado de los productos, de forma complementaria se ha evaluado la calidad de las propiedades bioquímicas, microbiológicas y sensoriales de los productos pesqueros.

Tabla 1. Matriz de síntesis de revisión de literatura de secado solar de productos marinos

| Autor                               | Título de la Investigación                                                                                      | Tipo de Secador Solar Usado                                          | Tipo de Pescado                 | Variables o parámetros reportados                             |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Bala BK, Mondol MRA (2001) (16)     | Experimental Investigation on Solar Drying of Fish Using Solar Tunnel Drier                                     | Secador solar tipo túnel                                             | Sardina                         | Tiempo de secado, contenido de humedad, eficiencia energética |
| Chavan BR et al. (2011) (17)        | Drying Performance, Quality Characteristics, and Financial Evaluation of Indian Mackerel Dried by a Solar Dryer | Secador híbrido solar-biomasa                                        | Caballa (Rastrilliger kangurta) | Propiedades bioquímicas, microbiológicas y sensoriales        |
| Basunia MA et al. (2011) (18)       | Drying of Fish Sardines in Oman Using Solar Tunnel Dryers                                                       | Secador solar tipo túnel                                             | Sardina                         | Humedad final, cinética de secado, calidad del producto       |
| Das T, Tiwari GN (2008) (19)        | Heat and Mass Transfer of Greenhouse Fish Drying under Forced Convection Mode                                   | Secador solar de convección forzada                                  | Pescados varios                 | Transferencia de calor y masa, modelos de secado              |
| Clement K, Mujaffar S (2004) (20)   | Sun and Solar Cabinet Drying of Salted Shark Fillets                                                            | Secador solar de gabinete                                            | Tiburón                         | Cinética de secado, contenido de sal, calidad final           |
| Bala BK, Janjai S (2005) (21)       | Solar Drying of Fish (Bombay Duck) Using Solar Tunnel Dryer                                                     | Secador solar tipo túnel                                             | Pato de Bombay (Bombay Duck)    | Humedad residual, cinética de secado, impacto de temperatura  |
| Fudholi A et al. (2010) (22)        | Review of Solar Dryers for Agricultural and Marine Products                                                     | Revisión de secadores solares para productos agrícolas y marinos     | Pescado y mariscos              | Tipos de secadores, eficiencia, impacto energético            |
| Alimohammadi Z et al. (2020) (23)   | Thermal Analysis of a Solar Dryer Equipped with PTSC and PCM Using Experimental and Numerical Methods           | Secador solar con colector parabólico y materiales de cambio de fase | Pescado                         | Análisis térmico, eficiencia energética, tiempo de secado     |
| Dewald Oosthuizen et al (2020) (24) | Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories           | Colectores solares de calentamiento de agua                          | Harina de pescado               | Calor de proceso, Valor presente neto                         |

| <b>Autor</b>                             | <b>Título de la Investigación</b>                                                                                          | <b>Tipo de Secador Solar Usado</b>                                  | <b>Tipo de Pescado</b>           | <b>Variables o parámetros reportados</b>                                             |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Deka et al. (2023) (25)                  | Techno-economics of solar assisted drying of small freshwater fish to ensure global nutritional security                   | Secador solar pasivo y secador solar híbrido con respaldo eléctrico | Especies pequeñas de agua dulce  | Cinética de secado, colorimetría y conservación de vitamina A, proteínas y grasas    |
| Loai et al. (2024) (26)                  | Design and Evaluation of a New Solar Dryer Equipped with Three Sides Flat Plate Collectors for Drying Tilapia Fish Fillets | Secador solar tipo gabinete                                         | Filete de tilapia                | Cantidad de bacterias, levadura y moho                                               |
| Castillo-Téllez et al. (2024) (27)       | Solar-Dried Biofertilizers from Marine Waste: Enhancing the Circular Economy                                               | Secador solar tipo invernadero                                      | Pescados varios, biofertilizante | Cinética de secado, macronutrientes del biofertilizante, contaminación de coliformes |
| Wang et al. (2022) (28)                  | Evaluation of Solar Drying on Drying Behaviour and Drying Kinetics of Penaeus vannamei                                     | Secador solar pasivo y secador solar con circulación forzada        | Camarón                          | Propiedades fisicoquímicas, cinética de secado y consumo de energía.                 |
| Mehta et al. (2018) (29)                 | Design and performance analysis of a mixed mode tent-type solar dryer for fish-drying in coastal areas                     | Secador solar pasivo                                                | Pez pato de Bombay               | Difusividad, eficiencia de secado y cinética de secado                               |
| Oluwasanmi I., Surajudeen O. (2019) (30) | Computational fluid dynamics and experimental analysis of direct solar dryer for fish                                      | Secador solar tipo gabinete, pasivo                                 | Pescados varios                  | Eficiencia y comportamiento térmico bajo diferentes condiciones climáticas           |

La revisión de la literatura muestra que el secado solar se ha aplicado principalmente a frutas, verduras y semillas, y en menor medida a productos pesqueros, sin embargo, aún existe una brecha del conocimiento en la aplicación del secado solar a especies específicas, como el cazón y el camarón. En particular, se desconoce la cinética de secado, la actividad de agua y porcentaje de humedad de dichas especies, en secadores solares tipo invernadero o con inyección de aire caliente. Esto representa un nicho de oportunidad para el estudio del comportamiento del secado y la evaluación de las propiedades microbiológicas, bioquímicas y organolépticas de las especies mencionadas después de ser procesadas mediante secado solar.

### **1.1 ANTECEDENTES**

El secado es una de las técnicas de conservación de alimentos más antiguas, utilizada desde tiempos prehistóricos para preservar productos perecederos y prolongar su vida útil en épocas de escasez. Este proceso consiste en la eliminación del agua contenida en los alimentos para inhibir la actividad microbiana y enzimática que provoca su deterioro. A lo largo de la historia, el secado ha evolucionado significativamente: los métodos tradicionales de secado al aire libre y a cielo abierto dieron lugar al desarrollo de secadores mecánicos y, más recientemente, a la implementación de secadores que utilizan energías renovables, como la solar. El uso de energía solar en procesos de deshidratación ha cobrado relevancia debido a su bajo costo operativo, su reducido impacto ambiental y su capacidad para mantener las propiedades organolépticas y nutritivas de los productos.

Con el avance de las últimas décadas, el enfoque de investigación ha estado en optimizar la eficiencia de estos procesos de secado para una variedad de productos, desde frutas y hortalizas hasta productos de origen animal. La importancia de estas tecnologías radica en su aplicabilidad para pequeños productores y comunidades rurales, donde el acceso a fuentes de energía convencionales es limitado. Sin embargo, el desarrollo de secadores solares para productos específicos, como los marinos, aún presenta desafíos técnicos que deben ser abordados para garantizar la calidad y seguridad alimentaria.

Las tecnologías de secado solar se dividen principalmente en dos tipos: secadores pasivos y secadores activos. Los secadores pasivos, también conocidos como secadores de convección natural, permiten que el aire caliente se mueva de manera espontánea a través del alimento debido a diferencias de temperatura. Estos equipos suelen ser más económicos y sencillos de construir, pero presentan tiempos de secado más largos y menor uniformidad en el proceso. Por otro lado, los secadores activos, o de convección forzada, utilizan ventiladores o bombas para acelerar el movimiento del aire caliente a través del material, mejorando así la eficiencia del secado y reduciendo el tiempo de procesamiento.

Un estudio pionero realizado en 2008 presentó una revisión exhaustiva de los distintos diseños de secadores solares disponibles y evaluó sus especificaciones de construcción, principios de funcionamiento y aplicaciones. La investigación concluyó que los secadores activos tienden a ser más adecuados para alimentos con alto contenido de humedad, como los productos marinos, pero requieren una

fuentes de energía adicionales para los ventiladores, lo que puede limitar su uso en áreas con recursos limitados (11).

En el contexto de los alimentos terrestres, el secado solar ha sido aplicado exitosamente en una amplia gama de productos. Un estudio de 2010 evaluó el uso del secado solar para chile habanero en comparación con un secador convencional tipo convectivo. Se encontró que, con un grosor de corte de entre 0.3 y 1.3 cm, el contenido de humedad del chile habanero se podía reducir hasta un 5% en 720 minutos de operación continua a temperaturas superiores a 50°C. Este resultado fue comparable en calidad a los métodos tradicionales, pero con un costo energético significativamente menor (14).

Otra investigación realizada en 2012 exploró la deshidratación de uvas para producir pasas utilizando secadores solares directos e indirectos, resaltando la capacidad de los colectores solares para mantener las características nutricionales y sensoriales del producto (12). Estos hallazgos impulsaron el uso de esta tecnología en otros productos, como frutas cítricas y verduras.

El secado solar no solo se utiliza para conservar alimentos, sino también como una alternativa ecológica para el tratamiento y aprovechamiento de residuos agroindustriales. En 2012, se aplicó el secado solar para deshidratar residuos de productos cítricos, convirtiéndolos en insumos para la industria farmacéutica, lo que permitió generar valor agregado a partir de productos que de otro modo se desecharían (31). Esta técnica ha demostrado ser eficaz para reducir la carga de residuos orgánicos, disminuir los costos de disposición y producir subproductos útiles para diversas industrias.

Los estudios también han explorado el rendimiento de secadores solares en comparación con tecnologías de combustibles fósiles. García y colaboradores (2012) llevaron a cabo una investigación comparativa utilizando un secador solar de flujo de aire inducido con un diseño matemático del colector solar y la cámara de secado, en pruebas con 10 kg de Uchuva (*Physalis peruviana*) (32). Aunque el tiempo de secado fue mayor en el secador solar, la eficiencia energética resultó en un ahorro de 250 kWh en comparación con los equipos convencionales, subrayando el potencial de esta tecnología para reducir costos en procesos industriales (15).

En 2015, Bistoni et al. (7) diseñaron un secador solar de gabinete con tres estantes, simulando su comportamiento térmico mediante el software Simusol. La capacidad de operar con tres temperaturas diferentes permitió procesar múltiples productos de manera simultánea, demostrando la versatilidad de este tipo de secadores para aplicaciones en pequeña escala.

La aplicación del secado solar en productos marinos ha recibido menor atención en comparación con otros alimentos. Los productos marinos presentan desafíos específicos debido a su alto contenido de agua, actividad enzimática y susceptibilidad a la oxidación. En 2018, Iriarte y Bistoni (33) estudiaron la cinética de secado de manzana utilizando un secador de túnel con convección forzada y uno con convección natural. Aunque este estudio no se centró en productos marinos, sus resultados son relevantes para entender cómo optimizar el secado en alimentos con alta actividad de agua (34).

A pesar de los avances, existe una necesidad de desarrollar tecnologías adaptadas para especies marinas como el cazón y el camarón. Investigaciones recientes han comenzado a abordar esta problemática, explorando la cinética de secado y las propiedades microbiológicas de estos productos bajo condiciones específicas de secado solar, con el fin de extender su vida útil y mejorar la seguridad alimentaria en comunidades costeras (13).

El diseño de secadores solares también se ha enfocado en la selección de materiales para mejorar su durabilidad y eficiencia. En 2017, se evaluaron distintos plásticos reforzados para la construcción de cubiertas de secadores tipo túnel, encontrando que estos materiales eran más resistentes a la radiación UV y prolongaban la vida útil del equipo sin comprometer el tiempo de secado. Esto representa un avance importante en la sostenibilidad y rentabilidad de los secadores solares para aplicaciones a largo plazo (10).

Aunque el secado solar ha demostrado ser una tecnología eficiente y sostenible para la conservación de alimentos, su aplicación en productos marinos aún presenta importantes desafíos técnicos. Los estudios revisados indican que es posible optimizar el proceso mediante ajustes en el diseño del secador, la implementación de tecnologías híbridas y el uso de materiales avanzados. La presente investigación busca contribuir a este campo desarrollando un secador solar adaptado a productos marinos, con el objetivo de mejorar la calidad del producto final y reducir el tiempo de secado, promoviendo así la sostenibilidad y seguridad alimentaria en regiones con recursos limitados.

## **1.2 MARCO TEÓRICO**

### ***1.2.1 Breve Historia del Secado como Método de Conservación***

El secado ha sido una de las técnicas de conservación de alimentos más utilizadas desde tiempos antiguos. Se utilizaba para preservar frutas, granos y carnes, asegurando su disponibilidad durante épocas de escasez y permitiendo un almacenamiento prolongado. Los métodos iniciales, como el secado al aire libre y el ahumado, fueron esenciales para la supervivencia de muchas civilizaciones. Estas prácticas consistían en la exposición directa de los alimentos al sol y al viento, lo que reducía el contenido de agua y ralentizaba la actividad microbiana. Aunque efectivos, estos métodos tradicionales no ofrecían un control adecuado sobre el proceso, lo que daba lugar a una variabilidad en la calidad del producto final y a un riesgo potencial de contaminación ambiental.

Con el avance de la ciencia y la tecnología, surgieron técnicas más eficientes y controladas para el secado, como los secadores mecánicos y, más recientemente, los secadores solares diseñados específicamente para aprovechar la energía solar de manera eficiente. La implementación de estas tecnologías ha permitido mantener la calidad organoléptica de los alimentos y minimizar la pérdida de nutrientes durante el proceso de secado. En particular, el uso de secadores solares controlados ha demostrado ser una alternativa económica y sostenible a los métodos convencionales basados en combustibles fósiles, destacándose por su bajo costo operativo y su capacidad de procesamiento a pequeña y gran escala.

### ***1.2.2 Importancia del Secado Solar en el Contexto Actual***

El secado solar se ha posicionado como una alternativa viable para la conservación de alimentos, especialmente en regiones con acceso limitado a infraestructura y recursos energéticos. A diferencia de métodos como la refrigeración y la congelación, que requieren inversiones significativas y un consumo energético constante, el secado solar puede implementarse con materiales de bajo costo y aprovechando la radiación solar directa. Esto lo convierte en una opción accesible para pequeños productores, comunidades rurales y áreas remotas, donde las opciones de conservación son escasas.

En el contexto actual de cambio climático y creciente inseguridad alimentaria, la implementación de tecnologías de secado solar ha cobrado una importancia crucial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cerca del 30% de los alimentos producidos a nivel mundial se desperdician, lo que contribuye significativamente a la inseguridad alimentaria global y a la generación de gases de efecto invernadero por la descomposición de alimentos perecederos. El secado solar puede contribuir a reducir este desperdicio al conservar los alimentos en condiciones óptimas, prolongando su vida útil y generando insumos de valor agregado como harinas y productos deshidratados, que pueden ser almacenados y transportados con mayor facilidad.

En las comunidades pesqueras y rurales, donde la refrigeración y la congelación no son económicamente viables, el secado solar permite procesar una amplia variedad de productos, como frutas, verduras y productos de origen animal. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología en productos marinos presenta desafíos

específicos debido a su alta actividad de agua y su susceptibilidad a la degradación microbiológica y bioquímica. A pesar de ello, estudios recientes han mostrado que el desarrollo de secadores solares adaptados para estos productos podría representar una solución efectiva para conservar su calidad nutricional y sensorial, y reducir así el desperdicio alimentario en regiones costeras.

Por ejemplo, en estudios realizados con secadores solares híbridos, que combinan radiación solar con un flujo de aire controlado, se ha encontrado que estos dispositivos pueden mejorar la eficiencia del proceso de secado en comparación con los secadores convencionales. La incorporación de sensores para monitorear temperatura y humedad durante el proceso ha permitido optimizar la uniformidad del secado y garantizar una mayor seguridad alimentaria. Estos avances demuestran el potencial del secado solar como una herramienta no solo para la conservación de alimentos, sino también para el desarrollo sostenible de comunidades rurales y costeras con acceso limitado a tecnologías de conservación.

El secado solar adquiere gran relevancia como una solución viable para la conservación de alimentos en contextos de pobreza (35) y desigualdad (36). En comunidades rurales y marginadas, donde el acceso a servicios básicos y tecnologías modernas de conservación es limitado, el secado solar puede contribuir a mejorar la seguridad alimentaria al prolongar la vida útil de los alimentos (37). A nivel global, la falta de tecnología adecuada para conservar productos agrícolas impacta especialmente a los pequeños agricultores, quienes

a menudo carecen de recursos para implementar métodos tradicionales como la refrigeración o congelación.

En regiones afectadas por conflictos bélicos, como la reciente guerra en Ucrania, se ha demostrado que el acceso a tecnologías simples y accesibles, como los secadores solares, podría ayudar a mitigar la escasez de alimentos al conservar los productos de manera eficiente y sostenible, sin necesidad de depender de fertilizantes y combustibles costosos (38). Esta tecnología no solo reduce el desperdicio alimentario, sino que también permite generar ingresos adicionales a las comunidades, al facilitar la producción de alimentos deshidratados con un valor agregado.

Además, el secado solar representa una herramienta para disminuir la desigualdad de género en el ámbito agrícola. Las mujeres rurales, que a menudo tienen menor acceso a recursos y capacitación, podrían beneficiarse de la implementación de secadores solares simples y de bajo costo, lo cual les permitiría conservar sus cosechas y contribuir a la economía familiar. En el contexto actual de cambio climático y crisis alimentaria global, el secado solar se posiciona como una tecnología que no solo aborda la conservación de alimentos, sino que también promueve la equidad y la sostenibilidad en las comunidades más vulnerables.

*Tabla 8 Porcentajes de pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo*

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Frutas y legumbres | 45% |
|--------------------|-----|

### **1.2.3 Deshidratado o secado**

La conservación de alimentos ha sido utilizada desde nuestros antepasados y el secado de estos es una de las técnicas más utilizadas para este propósito. El objetivo principal de la aplicación de este método es prolongar la duración de estos, debido a la disminución del agua contenida en los alimentos. De esta manera se impide el crecimiento de las bacterias y el trabajo de las enzimas. Deshidratación, secado o desecación es un procedimiento en el cual alimentos o productos son sometidos a un tratamiento en el cual se les aplica calor, concretamente aire caliente. Esta es una técnica en la cual se combinan la transferencia de calor y de masa, unidas de un cambio de fase. Se le puede definir como la utilización del calor bajo condiciones controladas o no controladas con el objetivo de disminuir gran parte del agua comúnmente contenida en los alimentos o productos a través de la evaporación (deshidratación o secado, 33).

El secado de alimentos es una de las técnicas de conservación más utilizadas a nivel industrial, ya que permite prolongar la vida útil de los productos y garantizar su inocuidad. Sin embargo, los métodos convencionales de secado, como los secadores por convección y los secadores por aspersión, presentan un alto consumo energético, lo que representa un desafío significativo en términos de costos y sostenibilidad ambiental. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en las últimas tres décadas el consumo eléctrico de la industria alimentaria ha aumentado en un 260% a nivel mundial (91).

El uso intensivo de energía en los procesos de secado se debe principalmente a la necesidad de alcanzar temperaturas elevadas y mantener un flujo de aire

constante para eliminar la humedad de los productos. En la industria alimentaria, las actividades relacionadas con el secado de productos representan una parte importante del consumo total de energía. Entre los métodos más comunes se encuentran los hornos para calentamiento, los túneles de secado, los secadores por aspersión y las columnas de destilación (34).

Sin embargo, el secado de alimentos presenta una alta demanda energética debido a la necesidad de mantener temperaturas elevadas y un flujo de aire constante durante largos períodos. Esta situación conlleva un incremento significativo en los costos operativos y, en muchos casos, un impacto ambiental negativo cuando se emplean fuentes de energía convencionales como combustibles fósiles. Para hacer frente a este problema, se propone el uso de energías renovables como la solar y la biomasa, las cuales pueden disminuir los costos energéticos y reducir las emisiones contaminantes. A continuación, se presentan algunas de estas energías renovables.

#### **1.2.4 Eólica**

La energía eólica es aquella que se aprovecha mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores, que utilizan una hélice para transmitir el movimiento que es producido por el viento en sus palas al rotor de un alternador. Las agrupaciones de varios aerogeneradores producen los llamados parques eólicos(42).

#### **1.2.5 Biomasa**

El nombre que se le otorga a los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles. El contenido

energético de la biomasa procede de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso de la fotosíntesis. Esta energía comprende todo un conjunto de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el ámbito energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta (41).

### **1.2.6 Geotermia**

Energía o calor natural proveniente de la profundidad de la tierra es una de las definiciones aceptadas que hacen referencia a la energía geotérmica, esta se presenta de forma natural al entrar en contacto agua filtrada con el calor presente en el subsuelo, lo que propicia la formación de fuentes termales, géiseres o volcanes. La fuente de energía se puede presentar en forma de agua caliente o vapor, de aquí se derivan dos formas de aprovechamiento. Cuando es fuente a baja temperatura se emplea en procesos industriales, agrícolas y urbanos. Cuando se tiene una fuente a alta temperatura puede ser aprovechada para producir electricidad, el vapor se conduce por tubería hasta una planta geotérmica que lo transforma en energía mecánica, para propulsar una turbina(43).

### **1.2.7 Mareomotriz**

El potencial energético de los mares y los océanos es muy grande, es por eso por lo que las posibilidades de ser convertido en electricidad son muchas. Dependiendo del tipo de aprovechamiento de dicho potencial energético, estas se pueden clasificar en la energía de las corrientes, en la cual se hace uso de la energía cinética que poseen las corrientes marinas mediante la instalación

submarina de estructuras similares a un aerogenerador; la energía mareo térmica, que emplea la variación entre la temperatura de la superficie y la temperatura de aguas profundas, la energía undimotriz o energía a partir del movimiento de las olas, que utiliza la fuerza con la que se desplaza determinada masa de agua a causa del rozamiento con las corrientes de aire (oleaje); y por último, la energía mareomotriz, que aprovecha el ascenso y descenso del agua del mar producidos por las fuerzas gravitatorias del sol y la luna(44).

#### **2.11.5 Hidráulica**

La energía hidráulica es aquella que se genera al transformar la fuerza del agua en energía eléctrica. Para el aprovechamiento de esta fuerza, se construyen infraestructuras hidráulicas muy grandes capaces de extraer el máximo potencial de este recurso renovable, autóctono y libre de emisiones(45).

### **1.3 ENERGÍA SOLAR**

La energía solar es aquella que se obtiene de la radiación solar que arriba a la tierra en forma de luz, calor o rayos ultravioleta. Es un tipo de energía limpia y renovable, pues su fuente, el sol, es un recurso ilimitado(40).

La energía del sol se genera cuando en su núcleo se generan reacciones de fusión en la cual el hidrógeno se transforma en helio. Los fotones que son partículas pequeñas de luz son los responsables de trasladar esta energía del área radiante hasta la zona convectiva que se localiza en la capa superior del interior del sol(43).

En este lugar el movimiento de gases hirviendo que tiene similitud con una lámpara de lava que transporta la energía a la superficie, este proceso dura más de un millón de años (46).

La radiación solar es la energía electromagnética emitida por el sol en forma natural y que se dispersa en todas direcciones, esta llega a la tierra en forma de luz, calor y rayos UV principalmente. El clima en la tierra se debe en gran medida a esta energía que, por otra parte, origina la mayoría de los procesos biológicos conocidos. Esta energía es tan abundante que si se aprovechara podría satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad,(47).

La energía en forma de calor proveniente del sol se denomina energía solar térmica. Es una fuente de energía de las llamadas primarias, al ser proveniente del sol, que es un recurso gratuito e ilimitado. Los sistemas solares térmicos tienen uno de los rendimientos de conversión energética de radiación solar a energía útil mayor del 50% siendo considerados como los factores de conversión más altos entre las diferentes energías renovables. Puede reemplazar o complementar sistemas que emplean combustibles fósiles y no genera emisiones de gases de efecto invernadero. Estos sistemas aprovechan la energía radiante del sol para calentar agua o cualquier otro fluido que posteriormente será utilizado en diversas aplicaciones, ya sea domésticas o industriales (47).

#### **1.4 EL SECADO SOLAR**

La energía solar térmica puede ser utilizada para realizar el secado de alimentos de forma más sustentable. El secador solar es un instrumento que bajo ciertas condiciones se encarga de remover la humedad de los alimentos con el propósito

de conservarlos por tiempos prolongados, de esta forma se inhibe el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, La reducción de peso y volumen resultan en una reducción de costos de transporte y almacenamiento (49).

Existen varios tipos de secadores solares, comúnmente se definen tres tipos, secadores solares directos, indirectos y mixtos (11).

#### **1.4.1 Secadores Solares Pasivos**

Los secadores solares pasivos o con ventilación pasiva, utilizan el movimiento natural del aire que al calentarse circula de forma natural por la fuerza de flotación o como resultado de la presión del viento o en combinación de ambos. Se pueden construir fácilmente con materiales económicos y disponibles localmente que los hace apropiados para aplicaciones pequeñas (11).

#### **1.4.2 Secadores Solares Activos**

Los secadores solares activos o con ventilación activa, funcionan con energía solar y se diseñan incorporando medios externos como ventiladores o bombas, para mover la energía solar en forma de aire calentado desde la zona de los colectores hasta los lechos del secado, entonces todos los secadores solares activos son por su aplicación secadores de convección forzada.(11)

#### **1.4.3 Secadores Solares Directos**

Estos secadores también denominados de cabina. Una parte de la radiación solar que incide en la cubierta de vidrio se refleja a la atmósfera y el resto se transmite dentro del secador de cabina. Además, una parte de la radiación transmitida se

reflecta desde la superficie del alimento. La parte restante es absorbida por la superficie del alimento(11).

#### **1.4.4 Secadores Solares Indirectos**

El alimento no se expone directamente a la radiación solar para minimizar la decoloración y el agrietamiento de la superficie de este. Poseen un colector solar donde ingresa el aire y tienen una cámara de secado que se utiliza para mantener al alimento en una bandeja de malla metálica, es decir tienen una cámara de secado separada donde se colocan los productos a secar (11).

En el secado solar indirecto el calor necesario para la evaporación se transfiere de forma convectiva desde el aire caliente hacia el material húmedo (12).

#### **1.4.5 Secadores Solares Mixtos**

Estos secadores se caracterizan porque la radiación se realiza tanto en el colector solar que se encuentra antes de la cámara de secado, así como en la misma cámara de secado que contiene el alimento y que recibe la radiación solar directa (11).

#### **1.4.6 Secadores Solares Tipo Invernadero**

Son secadores de grandes dimensiones cuyo desempeño está basado en el principio de funcionamiento del deshidratador solar directo. En estos secadores la circulación de aire es por convección forzada. Su construcción se basa en los diseños de invernaderos utilizados para agricultura. Tienen una ventaja importante sobre otros secadores ya que presentan alta capacidad de secado, pero debido a

sus grandes dimensiones es preciso una alta inversión para su puesta en marcha (34).

#### **4.13.8 Secadores solares tipo túnel**

Este modelo sirve para pequeños emprendimientos industriales. Consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro o madera y una cobertura transparente de lámina de polietileno (10).

#### **4.13.9 Secadores solares híbridos**

Los secadores solares híbridos pueden ser activados por más de una fuente de energía, por ejemplo, además de la energía solar puede contener un quemador de leña, lo que equivale a tener un sistema híbrido solar-biomasa (50).

### **4.14 Principios de secado solar**

#### ***Fundamentos Teóricos del Secado Solar***

##### ***Conceptos Básicos de Transferencia de Calor y Humedad***

El proceso de secado solar se basa en la transferencia simultánea de calor y de masa, que ocurre cuando el aire caliente entra en contacto con los alimentos. Este proceso implica el uso de energía térmica para calentar el aire que rodea al producto, facilitando la evaporación del agua contenida en el alimento. La energía absorbida por el producto incrementa la temperatura interna, promoviendo el cambio de fase del agua desde el interior hacia la superficie y, finalmente, hacia el ambiente. La transferencia de calor en el secado solar se realiza a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. La conducción transfiere calor a través del contacto directo del aire caliente con el alimento, la

convección se produce por el movimiento del aire que permite la eliminación del vapor de agua, y la radiación solar calienta directamente la superficie del producto. El control adecuado de estos mecanismos es esencial para garantizar un secado eficiente. Por ejemplo, un aumento en la intensidad de la radiación solar o en la velocidad del aire puede acelerar el proceso, pero si no se controla adecuadamente, puede causar un secado superficial excesivo, lo que dificulta la eliminación de humedad interna y puede afectar la calidad del producto final (27).

#### Efectos del Secado en la Calidad de los Alimentos

El secado afecta de manera significativa la calidad de los alimentos, alterando tanto sus propiedades físicas como nutricionales. A nivel químico, el secado reduce el contenido de agua, lo que previene el crecimiento microbiano y ralentiza las reacciones enzimáticas que causan la descomposición. Sin embargo, un secado mal controlado puede llevar a la pérdida de vitaminas termolábiles y provocar cambios en la estructura celular, resultando en una textura más dura y un color menos atractivo (28). Además, un proceso de secado que utilice temperaturas demasiado elevadas puede desnaturalizar proteínas y provocar oxidación de grasas, generando sabores indeseados y una menor calidad sensorial.

Por otro lado, las bajas temperaturas o tiempos prolongados de secado pueden causar un secado incompleto, aumentando el riesgo de crecimiento de microorganismos. La uniformidad del proceso de secado también es crítica; si el secado no es homogéneo, puede haber zonas con diferente contenido de humedad, afectando la estabilidad del producto final (29).

## Factores que Influyen en la Eficiencia del Secado Solar

La eficiencia del secado solar está influenciada por varios factores, los cuales deben ser controlados para asegurar que el proceso se realice en condiciones óptimas:

1. **Temperatura:** La temperatura del aire de secado es crucial para la eficiencia. Temperaturas más altas aceleran la evaporación del agua, pero también pueden causar daños en la calidad del alimento. El rango ideal varía entre 50°C y 70°C dependiendo del tipo de producto (30).
2. **Humedad Relativa del Aire:** La capacidad del aire para absorber agua depende de su humedad relativa. A menor humedad, mayor es la capacidad de absorber vapor de agua, lo que mejora la velocidad del secado. Sin embargo, si el aire está saturado, el proceso se ralentiza y se requiere mayor tiempo para eliminar la humedad (27).
3. **Velocidad del Aire:** La velocidad del aire influye en la eliminación del vapor de agua alrededor del alimento. Si es muy baja, el aire saturado no se reemplaza rápidamente; si es muy alta, puede provocar un secado superficial rápido que forme una capa impermeable en el producto, dificultando la eliminación de la humedad interna (28).
4. **Geometría y Espesor del Producto:** La forma y el tamaño del alimento influyen en el proceso de secado. Alimentos con una mayor superficie expuesta se secan más rápido. El espesor de las rodajas también determina la velocidad del secado; rodajas más gruesas requieren mayor tiempo y pueden presentar un secado no uniforme (30).

5. Radiación Solar: La intensidad de la radiación solar es la principal fuente de energía en el secado solar. Su variabilidad diaria y estacional impacta directamente la eficiencia del proceso. Los secadores con colectores solares mejoran la captación de energía, aumentando la temperatura del aire y reduciendo el tiempo de secado (29).

6. Diseño del Secador: El diseño influye en el flujo de aire y la distribución de calor dentro del secador. Un buen diseño asegura una distribución uniforme del calor y permite un control efectivo de la temperatura y la humedad dentro de la cámara de secado. La incorporación de sistemas de control automáticos permite mantener condiciones óptimas durante todo el proceso (30).

#### **4.14.1 Actividad del agua**

La actividad del agua ( $A_w$ ) en los alimentos está directamente relacionada con la estructura del producto y la proliferación de microorganismos dañinos como bacterias y patógenos que afectan la salud (47). Se define como la cantidad de agua libre en el alimento, disponible para el crecimiento microbiano y para reacciones químicas. Un menor valor de  $A_w$  implica mejor conservación, ya que la textura del alimento es más firme y su deterioro es más lento (48). A medida que disminuye la actividad de agua, el tejido del alimento se seca y se endurece, lo que lo hace más estable. En cambio, si la actividad del agua aumenta, los alimentos tienden a ablandarse, afectando su calidad y seguridad (51).

#### **4.14.2 Calor latente de vaporización**

La vaporización de una sustancia requiere un cambio de fase, lo cual implica agregar o eliminar una cantidad específica de calor. El calor latente de

vaporización se refiere a la energía necesaria para convertir 1 kg de agua en vapor, mientras que el calor latente de sublimación es la energía requerida para transformar 1 kg de agua sólida en vapor (52). La velocidad de secado depende de la rapidez con la que el calor se transfiere al agua para suministrar esta energía, aunque la eliminación del agua puede ser un factor limitante en algunos casos, afectando la eficiencia del proceso (92):

$$Q = h_s A (T_g - T_{sup}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Q$  = *Velocidad de transmisión de calor*

$h_s$  = *Coeficiente de convección*

$A$  = *Área en la cual tiene lugar el flujo de calor*

$T_g$  = *Temperatura del aire*

$T_{sup}$  = *Temperatura de la superficie del producto a secar*

#### **4. 14.3 Curvas de secado**

Al llevar al cabo el proceso de deshidratación, el agua contenida en los productos o alimentos no se remueve a una velocidad continua. En realidad, conforme avanza el secado la velocidad de reducción del agua se reduce cualesquiera que sean las circunstancias de secado predeterminadas (93).

Para obtener las curvas de secado a partir de un experimento, se toman muestras de manera periódica del producto que se está deshidratando y de esta forma se conoce la cantidad de humedad que se está eliminando. Las curvas de secado tienen una gran trascendencia ya que a través de ellas se obtiene un esquema gráfico del cambio que sufren las propiedades del producto de acuerdo con el

desarrollo del procedimiento, por otro lado, existen otras circunstancias externas como la velocidad con la que se extrae el agua. De esta manera se puede definir a las curvas de secado como gráficas de la humedad removida de un producto conforme transcurre el tiempo o dicho de otra manera como la relación que existe entre la eliminación de agua al paso del tiempo, es decir es una representación gráfica y simple del comportamiento del producto durante todo el proceso (92).

Los elementos para considerar para la elaboración de las curvas de secado son los siguientes:

### **Tiempo de secado**

El tiempo de secado depende del tipo de producto, grosor, tamaño del producto, temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del aire y radiación solar. Tiempos largos y bajas temperaturas en el proceso pueden afectar las propiedades tanto nutritivas como sensoriales del alimento, estos resultan menos dañados, cuando se utilizan tiempos cortos y altas temperaturas, a mayor contenido de agua mayor tiempo de secado; tamaños de trozos del producto más grandes inciden en un mayor tiempo de deshidratado; si la humedad relativa del aire es elevada, se requiere un mayor tiempo de secado; una velocidad del aire elevada, repercute en un menor tiempo para la desecación y una radiación solar elevada logra una temperatura elevada tanto en el colector como en la cámara de secado (94).

### **Masa de las bandejas y del producto**

Antes de comenzar con el experimento se deben de pesar juntos las bandejas y el producto a secar, la masa se debe considerar en gramos.

### **Masa del producto**

La masa del producto es la masa total antes de someterse al proceso de secado y se deberá estar registrando periódicamente conforme se haya estipulado.

### **Masa de sólido seco( $m_s$ )**

Esta definición se refiere a la masa de un sólido después de pasar por un procedimiento para retirar el mayor porcentaje de agua a través de algún método de secado, es decir es la masa de la muestra seca a la cual se le extrajo el agua libre que tenía en su estructura (92).

La fórmula matemática que se utiliza es la siguiente:

$$\text{Masa de sólido seco (\%)} = \frac{P'}{P}$$

Donde:

$P' = \text{peso de la muestra después del secado}$

$P = \text{peso de la muestra antes del secado}$

### **Masa de sólido húmedo( $m_h$ )**

Es la masa de la muestra húmeda, es decir es la muestra sólida antes de ser sometida al proceso de disminución de agua a través de algún método de secado (94).

### **Humedad**

Se denomina humedad a la cantidad de agua que tiene un cuerpo en relación con su masa total expresada en porcentaje y se puede expresar de dos maneras, humedad en base húmeda o humedad en base seca (92).

- **Humedad en base húmeda ( $X_{bh}$ )**

Humedad en base húmeda es la cantidad de agua respecto a la cantidad total del cuerpo donde se incluye en esa masa total, la masa de la propia agua más la masa del sólido expresado en porcentaje (96).

Matemáticamente el contenido de humedad en base húmeda se calcula con la ecuación 2.

$$\%X_{bh} = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

- **Humedad en base seca ( $X_{bs}$ )**

Humedad en base seca es una medida expresada en porcentaje de la masa de una muestra, en referencia a su masa total, después de someterse a un procedimiento de secado (94).

Matemáticamente el contenido de humedad en base seca se calcula con la ecuación 3.

$$\%X_{bs} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

La curva de humedad de un producto a secar puede medido respecto al tiempo, esto se puede observar en la figura 7.

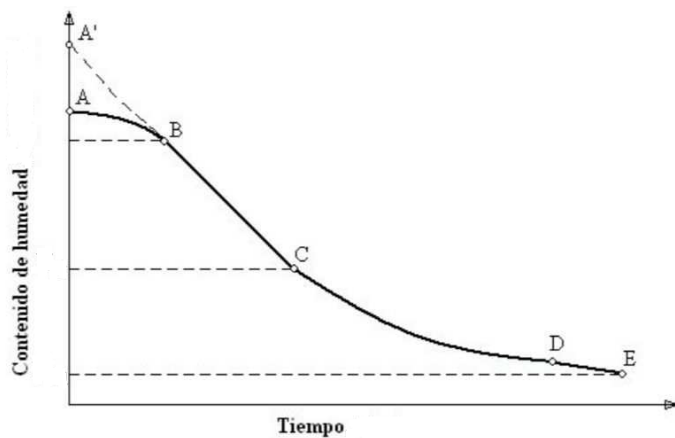


Figura 7. Curva de humedad de un producto a secar medido respecto al tiempo.

Tomado de Operaciones unitarias II. Secado (96).

En el gráfico se observan las siguientes fases (96):

- A→B: esta es una fase que por lo general tiene un tiempo corto de duración, en la cual el producto inicia el calentamiento y en la cual la evaporación no es representativa ni en intensidad ni en cantidad.
- B→C: es la primera etapa de secado en la cual la velocidad de este es constante, por lo tanto, se lleva a cabo la evaporación de la humedad libre también llamada no ligada del componente. En este período el sólido no absorbe humedad, es decir tiene un comportamiento no higroscópico.
- C→D: este es un período de velocidad de secado decreciente, donde se evapora la humedad ligada del producto.
- D→E: esta es la fase en la cual la evaporación sucede desde el interior del producto y finaliza hasta que no existe secado adicional.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de una curva de secado, de la humedad en base seca respecto al tiempo, en un experimento de secado de filete de cazón, también es posible obtener la curva de secado en base húmeda respecto al tiempo.

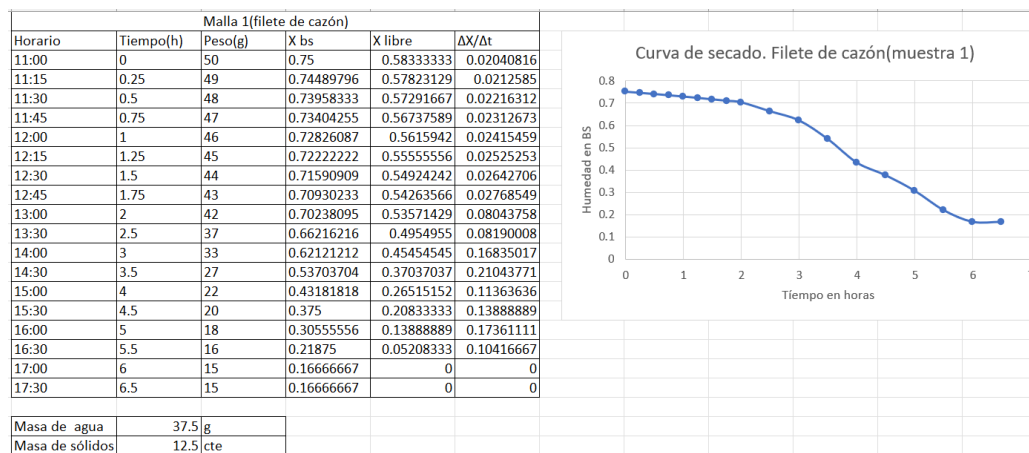


Figura 8. Ejemplo de una curva de secado de la humedad en base seca respecto al tiempo. Elaboración propia

### **Velocidad de secado (g de agua/g de sólido seco-tiempo)**

Se refiere a los puntos de humedad que se extraen en una unidad de tiempo por lo general una hora, transmite la energía necesaria para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación. Transporta la humedad saliente del material para de esta manera lograr un secado rápido, uniforme y eficaz (93).

### **Curva de velocidad de secado**

Esta curva determina la fase de deshidratado cuando la velocidad es constante y cuando esta decrece, de la misma manera el tiempo que transcurre en esta transición (figura 9). Con el objetivo de determinar horarios de secado y especificar las dimensiones del secador, es prioritario conocer el tiempo que será necesario para deshidratar un producto en base a su cantidad de humedad en circunstancias concretas. En consecuencia, la velocidad de secado se puede calcular con la siguiente expresión (94):

$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

Donde:

$$R = \text{Velocidad de secado} \left( \frac{g \text{ de agua}}{hm^2} \right)$$

$$m_s = \text{Masa del sólido seco (g)}$$

$$A = \text{Área de transferencia}(m^2)$$

$$\Delta X = \text{Diferencial de masa de agua/masa seca} \left( \frac{g \text{ de agua}}{g \text{ de masa seca}} \right)$$

$$\Delta t = \text{Diferencial del tiempo}(h)$$

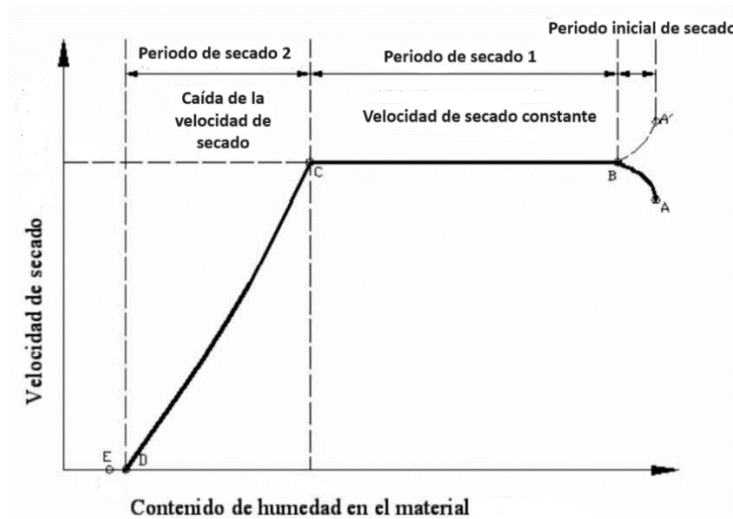


Figura 9. Curva de rapidez de secado con condiciones de secado constantes.

Tomado de Operaciones unitarias II. Secado (96).

## 1.5 TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía eléctrica generada a partir de la energía solar térmica se puede definir como el resultado de un proceso mediante el cual la energía del sol se recolecta y se convierte en electricidad mediante el uso de algún tipo de dispositivo para convertir el calor en electricidad. Esta energía también es denominada termo solar (47).

### **1.5.1 Colectores Solares, Tipos y Funcionamiento**

Cuatro características son esenciales para la clasificación de colectores solares térmicos, por su principio de circulación, debido a su sistema de transferencia de calor, a causa de su presión de trabajo y en virtud de su diseño(53).

### **1.5.2 Tipos de Colectores Solares**

- Por el principio de circulación, circulación natural o circulación forzada.
- Por sistema de transferencia de calor, directo o indirecto.
- Por diseño, equipos compactos o a la medida.
- Por presión de trabajo: abiertos o cerrados(54).

### **1.5.3 Funcionamiento**

Los tipos de colectores solares y su funcionamiento se muestran de la tabla 10 a la tabla 13 (55).

*Tabla 10. Colectores solares por su tipo de circulación*

| <b>Circulación Natural o Termo sifónicos</b>                                                       | <b>Sistemas Forzados</b>                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| No utilizan bombas o ventiladores para el movimiento del fluido entre el colector y el acumulador. | Los sistemas forzados usan una bomba y un controlador para circular el fluido que transporta el calor dentro del colector.                           |
| La circulación del agua caliente es por efecto de la gravedad.                                     | Por lo general los colectores están ubicados sobre el techo de las construcciones y el tanque se sitúa en una sala de máquinas.<br>El fluido circula |

desde el colector al tanque por acción de una bomba.

El agua dentro del colector es calentada por el sol, haciendo que disminuya su densidad y fluye hacia arriba para entrar al tanque de almacenamiento, mientras que el agua fría, de mayor densidad, fluye hacia abajo creando una circulación continúa.

El flujo convectivo o termo sifónico continúa mientras haya calor del sol.

El colector se utiliza para calentar el fluido que es el portador de calor, y este a su vez intercambia calor con el agua de consumo a través de un serpentín ubicado en el interior de un tanque de acumulación.

En casi todos los casos, la bomba se pone en marcha cuando existe el calor necesario en el colector y este es removido, cuando la diferencia de temperatura entre el fluido del colector y el agua de almacenamiento es mayor a 6°C.

Tabla. 11. Colectores solares por sistema de transferencia de calor

| Por sistema de transferencia de calor Directo | Por sistema de transferencia de calor Indirecto |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utilizan el mismo fluido en el colector y en el acumulador, siendo este fluido el agua de consumo.                                                                                                                 | Existe un fluido en el colector que transporta el calor, por medio de algún medio de intercambio, hacia el agua de consumo que se encuentra en el acumulador. Este fluido que transporta el calor es un fluido con propiedades anticongelantes. |
| Al no contar con intercambiador de calor, y utilizar el agua de consumo directamente en el colector, están expuestos al daño por congelamiento en lugares donde la temperatura ambiente cae por debajo de los 4°C. | Utilizan un intercambiador de calor entre el fluido transportador de calor que se encuentra en el colector, y el agua potable que se encuentra en el acumulador.                                                                                |
| Se utilizan en climas donde no exista riesgo de ocurrencia de congelamiento, son económicos y tienen un rendimiento similar a los indirectos.                                                                      | Se utilizan en climas fríos y pueden atender varias aplicaciones con un mismo sistema usando intercambiadores de calor para cada aplicación.                                                                                                    |

*Tabla 12. Colectores solares por su tipo de diseño*

| <b>Por diseño, equipos compactos</b> | <b>Por diseño, equipos a la medida</b> |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
|--------------------------------------|----------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Son productos con marca registrada, que son vendidos como equipos completos y preparados para instalarse, con configuraciones predeterminadas.                                          | Están contruidos de forma exclusiva, son considerados como un conjunto de componentes.                                                                         |
| Son considerados como un producto individual y se prueban en un laboratorio de ensayo como un todo.                                                                                     | Sus componentes son ensayados de forma individual y los resultados de la evaluación son integrados como un sistema completo.                                   |
| Si se modifica alguna parte de un sistema compacto, cambiando su configuración entonces se le considera como un sistema nuevo. Se utilizan exclusivamente para agua caliente sanitaria. | En esta categoría se hallan los sistemas para calefacción y climatización de piscinas, asimismo los sistemas de agua caliente sanitaria diseñados a la medida. |

*Tabla 13. Colectores solares por su presión de trabajo*

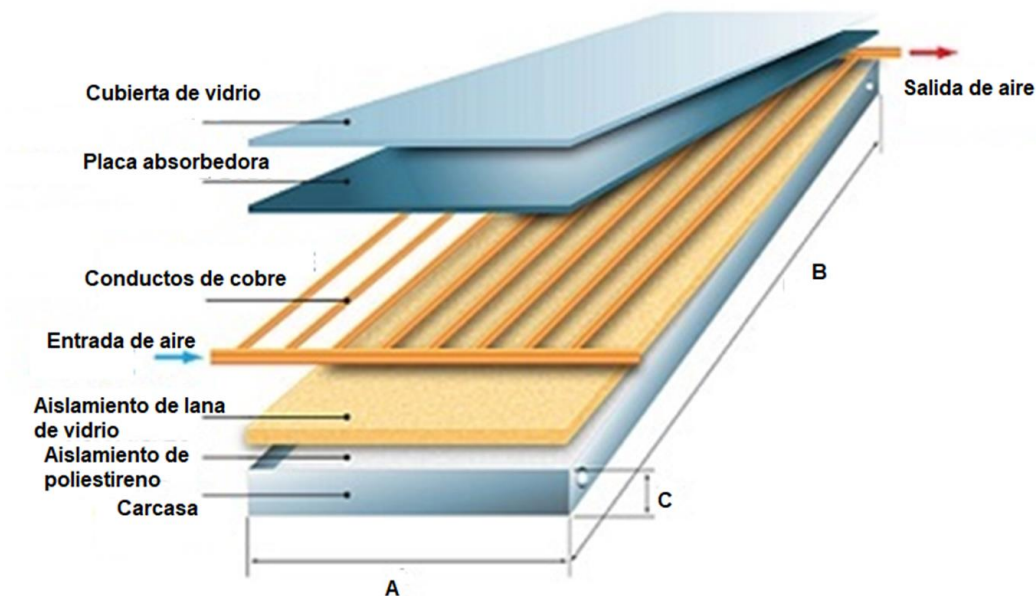
| <b>Por presión de trabajo, abiertos</b>                                                                      | <b>Por presión de trabajo, cerrados</b>                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| En estos sistemas el tanque de acumulación por donde fluye el agua de consumo trabaja a presión atmosférica. | El agua en el tanque está presurizada a una presión específica, por lo general entre 2 y 4 kg/cm <sup>2</sup> . Esto indica que el tanque |

|  |                                                       |
|--|-------------------------------------------------------|
|  | de almacenamiento no tiene contacto con la atmósfera. |
|--|-------------------------------------------------------|

#### 1.5.4 Colector Solar de Aire

Como su nombre lo indica, los colectores solares de aire son dispositivos que usan el aire para la transferencia de calor. En el mercado existen diferentes tipos los cuales pueden utilizar tubos cubiertos o sin cubrir. Su principio de funcionamiento se basa en la convección natural para transportar el aire o utilizan ventiladores en cuyo caso se aplica la convección forzada. En las aplicaciones industriales los colectores de aire se emplean en procedimientos de secado, abasteciendo de aire caliente que pueden alcanzar hasta 100°C(54).

En la figura 10, se observan las partes principales de un colector solar plano de aire(55).



*Figura 10. Partes principales de un colector solar plano de aire. Tomado de Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao (57).*

## **1.6 IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE SECADORES SOLARES**

Aunque en los últimos años el diseño de secadores solares ha adquirido gran relevancia, aún no se logra el impacto deseado por los expertos en el tema. Con la presente crisis energética y el aumento de los precios de los combustibles, se ha propiciado la necesidad de emplear y diseñar secadores con energías renovables.

### **1.6.1 Parámetros de Diseño**

En el diseño de secadores solares se deben de considerar parámetros importantes en la tabla 14 se pueden observar estas características(56).

*Tabla 14. Parámetros importantes en el diseño de un secador solar*

| Material      | Características                                                                                                                                         |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acrílico      | Resistente a los rayos UV<br>Alta claridad óptica<br>Resistente al rayado<br>Se puede usar hasta 87°C<br>Sensibles a los productos químicos             |
| Policarbonato | Resistente a los rayos UV<br>Buena claridad óptica<br>Alta resistencia a los impactos<br>Tolerante a temperaturas extremas<br>Resistente a los químicos |

### **1.6.2 Aire**

El trabajo de la circulación del aire dentro de un secador solar tiene como objetivo eliminar o disminuir la humedad evaporada dentro del producto o alimento(57).

Diversos métodos son utilizados para lograr la circulación del aire. Entre los cuales tenemos:

- Circulación forzada: el aire es trasladado por un ventilador que emplea energía eléctrica o mecánica.
- Circulación por convección natural: la acción del aire se lleva a cabo por la diferencia de temperatura existentes en el equipo, no es necesaria algún

tipo de energía mecánica externa. El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural.

- Circulación por acción del viento: la circulación de aire es originada por el viento que predomina en el área. En ocasiones el viento tiene un comportamiento indirecto moviendo un ventilador que ocasiona el movimiento del aire en el interior del secador solar(57).

### **1.6.3 Humedad**

Remover el mayor porcentaje posible de humedad es uno de los objetivos del proceso de secado. Uno de los parámetros característicos de la conducta del secador es el vínculo que existe entre la humedad relativa interna y la humedad relativa externa de éste. La humedad relativa interna se comporta dependiendo de la etapa en la que se encuentre el proceso de secado. En la primera etapa del desarrollo del secado la humedad relativa interna se incrementa, debido a que el producto libera la mayor cantidad de vapor de agua. Conforme el secado avanza la humedad relativa disminuye(58).

### **1.6.4 Temperatura**

La variable de mayor flexibilidad en el proceso de secado es la temperatura del aire de secado a elevadas temperaturas, esta tiene influencia significativa en la eficiencia del secado además de la calidad del producto final. El incremento de la temperatura equivale a una disminución del consumo de energía por unidad de agua evaporada y a un incremento del índice de secado. La temperatura de secado, en conjunto con la circulación del aire, son los dos factores que determinan la cantidad de agua evaporada en un secador solar(59).

### **1.6.5 Color**

El color o la colorimetría es un factor que repercute en la conducta de las variables climatológicas presentes en el secado de diversos productos. La colorimetría es la ciencia que investiga la medida de los colores y los métodos tienen como base la cantidad de absorción de la radiación solar en el área visible de los modelos o elementos seleccionados. Existen varios sistemas para determinar la colorimetría de los productos a secar, pero en la actualidad el sistema CIELAB es uno de los más populares dado que es empleado para especificar los colores cuando se habla de secado de alimentos, en este procedimiento la  $L^*$  simboliza la parte central del eje, determinando la transparencia y exponiendo  $L=0$  (negro o absorción total) en el fondo, la  $a^*$  describe el valor rojo-verde, en corrimiento de izquierda a derecha y la  $b^*$  el valor amarillo-azul, plasma un intercambio cuyo recorrido es en dirección al color amarillo(60).

### **1.6.6 Material**

Los materiales para el diseño de secadores solares dependen en gran medida del tipo de secador solar que se va a implementar, del producto que se va a secar y de las condiciones climatológicas del lugar en el cual se utilizará dicho secador, de manera general los materiales utilizados se muestran en la tabla 15.

*Tabla 15. Materiales más utilizados en secadores solares*

|                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| <b>Colector</b> | Cubierta de vidrio               |
|                 | Cubierta absolvedora de aluminio |
|                 | Conductos de cobre               |
|                 | Aislamiento de lana de vidrio    |

---

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | Aislamiento de poliestireno                                                                                                                                                                                                                                           |
|                         | Acero                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Cámara de secado</b> | Fue construida con policarbonato, ya que es un material con alta resistencia a los rayos UV y a los impactos, traslúcido y claro como el acrílico, es más tolerante a temperaturas elevadas y tiene gran resistencia a productos químicos.                            |
| <b>Charolas</b>         | Las tres charolas que están colocadas dentro de la cámara de secado fueron elaboradas a base de hoja metálica calibre 14 con perforaciones de 3mm. Las dimensiones de las charolas son de 0.95m x 0.66m con marco de solera calibre 14, pintadas en color negro mate. |

---

Se pretende que el deshidratador funcione la mayor parte del tiempo con energía solar, pero se le adaptará un circuito electrónico auxiliar que se pueda utilizar cuando las condiciones climatológicas no permitan que sea posible el sacado de productos.

Otros materiales que son comúnmente utilizados para la construcción de cámaras de secado se describen a continuación:

**Acrílico:** es de plásticos que más se aplican, sobre todo al aire. Libre. Alta resistencia a los rayos UV, gran claridad óptica y oposición al rayado. Es traslúcido y la aplicación de color es fácil.

**Policarbonato:** alta resistencia a los rayos UV y a los impactos traslúcido y claro como el acrílico, es más tolerante a temperaturas elevadas, gran resistencia a productos químicos.

**HDPE:** también llamado polietileno de alta densidad es un plástico polimérico a base de etileno. Es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial, tiene gran resistencia a los rayos UV y gran diversidad de atributos prácticos.

Polieteramida: la PEI, por sus siglas en inglés, tiene gran resistencia a los rayos UV, es apropiada para empleos en procesos industriales, mecánicos y químicos. Gran resistencia al calor, a la tracción. Es transparente.

**Sulfuro de polietileno:** El (PPS), es un plástico que tiene gran resistencia a los rayos UV, al fuego y al calor y como propiedad principal extraordinaria resistencia química, gran fuerza y durabilidad, sin embargo, también lo limita a colores más oscuros.

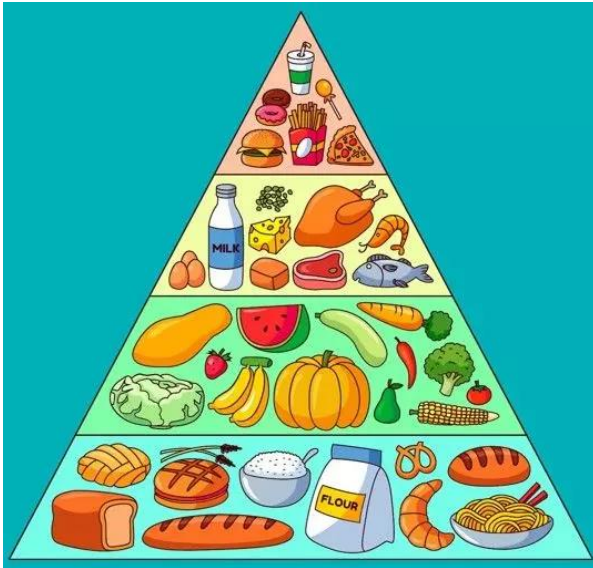
El secado solar no solo se destaca como una técnica eficiente y sostenible para la conservación de alimentos, sino que también juega un papel fundamental en la seguridad alimentaria al permitir la preservación de productos en regiones con acceso limitado a tecnología y energía. La implementación de este método no solo prolonga la vida útil de los alimentos, sino que mantiene sus propiedades nutritivas, lo cual resulta crucial en el contexto de garantizar una buena alimentación para la población. En este sentido, al conservar productos marinos y agrícolas mediante secado solar, se facilita la disponibilidad de alimentos nutritivos a lo largo del año, contribuyendo a la diversificación de la dieta y a la reducción de desperdicio, todo ello de manera sostenible y con un menor impacto

ambiental. La importancia de conservar las propiedades nutricionales y funcionales de los alimentos radica en lo fundamental que resulta para mantener la salud y prevenir enfermedades.

Para ello, la alimentación debe cumplir con seis características: ser **completa**, incorporando alimentos de todos los grupos establecidos en el *Plato del Bien Comer* de la Norma Oficial Mexicana (NOM), que incluye cereales y tubérculos, frutas y verduras, leguminosas y alimentos de origen animal (68); **variada**, combinando diferentes alimentos en las comidas principales (67); **equilibrada**, manteniendo las proporciones recomendadas de cada grupo (67); **suficiente**, cubriendo las necesidades nutricionales y calóricas según la edad, sexo y actividad física (68); **adecuada**, adaptada a las preferencias y condiciones culturales de los consumidores (67); e **inocua**, asegurando que los alimentos estén libres de contaminantes (67).



Figura 1. Plato del bien comer. Tomado de GUÍAS ALIMENTARIAS 2023 PARA LA POBLACIÓN MEXICANA (68)



*Figura 2. Pirámide alimentaria. Tomado de Platos, pirámides y planeta (69)*

Los macronutrientes necesarios para una dieta saludable se dividen en: **carbohidratos**, que aportan energía y fibra, y se encuentran en cereales y frutas (69); **lípidos**, presentes en carnes, aceites y frutos secos, que regulan funciones metabólicas y deben elegirse cuidadosamente para evitar el consumo de grasas saturadas (68); y **proteínas**, esenciales para la estructura corporal, presentes en carnes, lácteos, leguminosas y frutos secos (70).

Además, herramientas visuales como la pirámide alimentaria ayudan a entender la importancia de consumir alimentos de manera balanceada y moderada, según sus diferentes niveles y características nutricionales (69).

Ahora bien, la importancia de una alimentación a base de productos del mar reside en que favorece la reducción de enfermedades cardiovasculares, en el decremento de la incidencia de la presión arterial, y desarrolla funciones en etapas fundamentales como lo son la lactancia, infancia y en el embarazo (62).

Los productos marinos son alimentos idóneos para todas las edades y deben de ingerirse regularmente, tienen características particulares como los son la fácil digestión esto debido a su bajo contenido de colágeno, contiene proteínas, con aporte de aminoácidos fundamentales que el organismo no puede sintetizar, vitaminas y minerales y contienen poca grasa(63).

Los pescados son especies comestibles extraídas del agua con bajo contenido de sodio y grasas, y son ricos en vitaminas A, D, E, B6, y B12, así como en yodo y proteínas, especialmente los pescados azules. Los mariscos, por otro lado, son animales marinos comestibles que no pertenecen a la especie de los peces y contienen menos de 1.5% de grasa por cada 100 g. Entre los mariscos más consumidos están las almejas, mejillones, calamar, camarones y langostas. Las tablas 1 y 2 presentan los valores nutricionales de pescados y mariscos (64) (71).

*Tabla 1. Valor nutricional de diferentes especies de pescados*

| No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones. | Nombre científico                                      | Energía (Kcal) | Grasa(g) | Proteína(g) | Vitamina                |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|----------|-------------|-------------------------|
| Bagre                                                 | <i>Ariopsis felis</i>                                  | 119            | 2.8      | 16.3        | A, B3, B9, B12, D, E, K |
| Barracuda (picuda)                                    | <i>Sphyraena guachancho</i>                            | 91             |          |             | B1, B2, B3, B6, B12, D  |
| Besugo                                                | <i>Rhomboplites aurorubens</i>                         | 121            | 4.9      | 19.1        | A, B12, B3, B5, B9      |
| Cabrilla                                              | <i>Mycteroperca 60 osácea, Epinephelus labriformis</i> | 87             | 20.1     |             | B1, B2, B3              |
| Cazón                                                 | <i>Rhizoprionodon terraenovae, Sphyrna tiburo</i>      | 82             | 0.8      | 18.7        | A, B12                  |
| Corvina                                               | <i>Cynoscion arenarius, Cynoscion nebulosus</i>        | 104            | 3.1      | 17.7        | Grupo B                 |

| No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones. | Nombre científico                                                                    | Energía (Kcal) | Grasa(g) | Proteína(g) | Vitamina                 |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------|-------------|--------------------------|
| Esmedregal                                            | <i>Seriola dumerili</i>                                                              | 153            | 6.0      | 24.7        | A, B3, B12, C, D         |
| Jurel (Gallego)                                       | <i>Caranx latus</i>                                                                  | 102            | 5.2      | 15.4        | A, B1, C, E              |
| Lisa                                                  | <i>Mugil cephalus</i>                                                                | 119            | 3.3      | 20.8        |                          |
| Mero                                                  | <i>Epinephelus morio</i>                                                             | 78             | 2.2      | 20.8        | A, B9                    |
| Mojarra de mar                                        | <i>Calamus bajonado</i> ,<br><i>Diapterus auratus</i>                                | 97             | 2.2      | 14.1        | B, D, E                  |
| Pámpano                                               | <i>Trachinotus goodei</i>                                                            | 164            | 9.4      | 18.4        | A, B3, B6, B9, B12, C, E |
| Pargo                                                 | <i>Lutjanus argentiventris</i> , L.<br><i>colorado</i> , L.<br><i>novemfasciatus</i> | 109            | 2.7      | 18.8        | A, B6, B12, C            |
| Róbalo                                                | <i>Centropomus undecimalis</i>                                                       | 94             | 2.0      | 18.4        | A, B12, E, B3, B9        |
| Sierra                                                | <i>Scomberomorus maculatus</i>                                                       | 114            | 4.6      | 21.8        | A, B12                   |
| Tilapia                                               | <i>Oreochromis niloticus</i>                                                         | 129            | 2.7      | 26          | B6, D, B12               |

Tabla 2. Valor nutricional de diferentes especies de mariscos

| Nombre común             | Nombre científico             | Energía (kcal) | Grasas (g) | Proteínas (g) | Carbohidratos (g) | Vitaminas                       |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|------------|---------------|-------------------|---------------------------------|
| Calamar                  | <i>Loligo vulgaris</i>        | 92             | 1.3        | 15.8          | 3.08              | A, B1, B2, B3, B6, B12, C       |
| Camarón                  | <i>Palaemon serratus</i>      | 106            | 1.7        | 20.3          | 0.9               | A, B1, B2, B3, B6, B12, C, D, E |
| Caracol (chivita, nólón) | <i>Melongena corona</i>       | 136            | 0.4        | 23.0          | 7.76              | A, B1, B2, B3, B6, B12, C, D, E |
| Langosta                 | <i>Panulirus argus</i>        | 106            | 0.9        | 16.2          | 0.5               | B1, B2, B3, B12                 |
| Langostino               | <i>Macrobrachium carcinus</i> | 77             | 0.9        | 15.9          | 0                 | A, B1, B2, B3, B6, B12, C       |

| Nombre común   | Nombre científico               | Energía (kcal) | Grasas (g) | Proteínas (g) | Carbohidratos (g) | Vitaminas                 |
|----------------|---------------------------------|----------------|------------|---------------|-------------------|---------------------------|
| Pulpo          | Octopus vulgaris                | 57             | 1.4        | 17.9          | 2.2               | A, B1, B2, B3, B6, B12, C |
| Raya           | Batoidea                        | 82             | 0.9        | 18.8          | 0                 | B2, B3                    |
| Ostión         | <i>Crassostrea corteziensis</i> | 31             | 1.0        | 3.4           | 1.6               | B12                       |
| Callo de hacha | <i>Atrina maura</i>             | 119            | 5.2        | 16.9          |                   | A, B1, C y D.             |

Pese a que son contemplados como alimentos perecederos los productos procedentes del mar constituyen una extraordinaria fuente de nutrientes, entre estos productos están comprendidos todos los mariscos: sus proteínas tienen un gran valor biológico y su contenido en minerales (Ca, Mg, P), oligoelementos y vitaminas son variadas, las grasas contenidas, menos abundantes, son del tipo poliinsaturadas en especial el omega-3 (61).

Dos de los ácidos grasos que sobresalen en los pescados y mariscos proceden del fitoplancton y algas que son alimento de los pescados y mariscos; el ser humano no es capaz de sintetizar los ácidos omaga-3, por lo que su ingesta debe ser a través de una dieta; otros ácidos fundamentales para las correctas funciones estructurales del organismo como el ácido linolénico y sus derivados están incluidos en los alimentos provenientes del mar (64).

Las composiciones químicas son fundamentales en los productos provenientes del mar, algunas de ellas se muestran en la tabla 3 (64).

Tabla 3. Composición química de algunos productos marinos

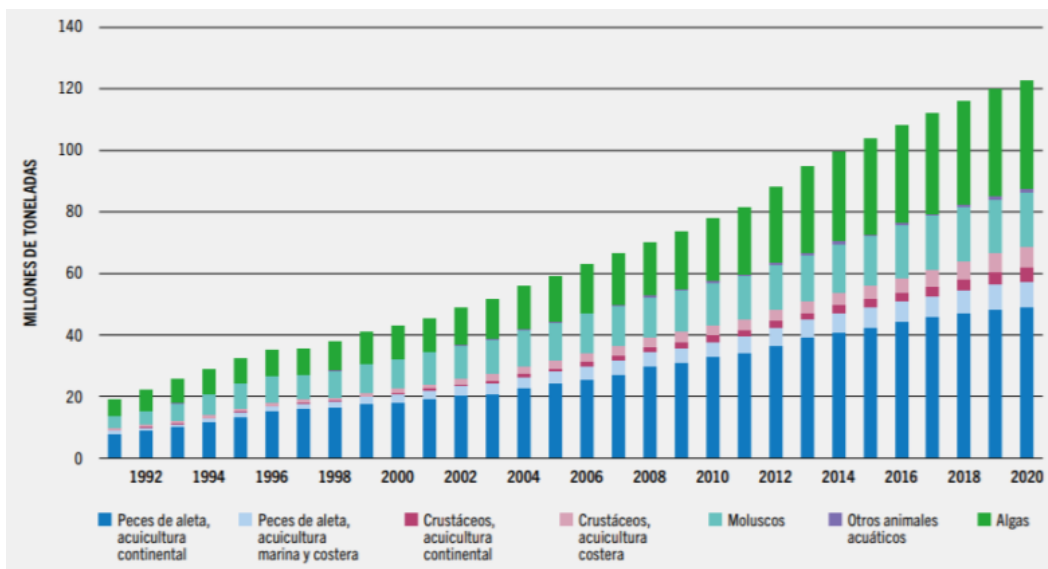
| Especie     | Nombre                     | Agua  | Lípidos % | Proteínas |
|-------------|----------------------------|-------|-----------|-----------|
|             | Científico                 | %     |           | %         |
| Bacaladilla | Micromesistius poutassou   | 79-80 | 1.9-3.0   | 13.8-15.9 |
| Bacalao     | Gadus morhua               | 78-83 | 0.1-0.9   | 15.0-19.0 |
| Anguila     | Gadus morhua               | 78-83 | 0.1-0.9   | 15.0-19.0 |
| Anguila     | Anguilla anguilla          | 60-71 | 8.0-31.0  | 14.4      |
| Arenque     | Clupea arengus             | 60-80 | 0.4-22.0  | 16.0-19.0 |
| Solla       | Pleuronectes platessa      | 81    | 1.1-3.6   | 15.7-17.8 |
| Salmón      | Salmo salar                | 67-77 | 0.3-14.0  | 21.5      |
| Trucha      | Salmo trutta               | 70-79 | 1.2-10.8  | 18.8-19.1 |
| Atún        | Thunnus spp                | 71    | 4.1       | 25.2      |
| Cigala      | Nephrops norvegicus        | 77    | 0.6-2.0   | 19.5      |
| Pejerrey    | Basilichthys bomariensis   | 80    | 0.7-3.6   | 17.3-17.9 |
| Carpa       | Cyprinus carpio            | 81.6  | 2.1       | 16.0      |
| Sábalo      | Prochilodus platensis      | 67.0  | 4.3       | 23.4      |
| Pacu        | Colosoma macropomum        | 67.1  | 18.0      | 14.1      |
| Tambaqui    | Colosoma brachypomum       | 69.3  | 15.6      | 15.8      |
| Chincuiña   | Pseudoplatystoma tigrinum  | 70.8  | 8.9       | 15.8      |
| Corvina     | Plagioscion squamosissimus | 67.9  | 5.9       | 21.7      |

| <b>Especie</b> | <b>Nombre</b>     | <b>Agua</b> | <b>Lípidos %</b> | <b>Proteínas</b> |
|----------------|-------------------|-------------|------------------|------------------|
|                | <b>Científico</b> | <b>%</b>    |                  | <b>%</b>         |
| Bagre          | Ageneiosus spp    | 79.0        | 3.7              | 14.8             |
| Camarón        | Palaemon serratus | 80.3        | 1.7- 8.00        | 40               |
| Calamar        | Loligo vulgaris   | 75-84       | 0.1-2.7          | 13-22            |
| Pulpo          | Octopus vulgaris  | 80.0        | 1.4              | 17.9             |

### ***1.6.7 Producción Mundial de Pesca y Acuicultura***

En la actualidad, la pesca y la acuicultura son sectores clave para la seguridad alimentaria global. Según la FAO, en 2018 la producción mundial de animales marinos fue de 179 millones de toneladas, cifra que disminuyó ligeramente a 178 millones en 2020 (72). En ese año, la pesca de captura generó 90 millones de toneladas (51%), mientras que la acuicultura aportó 88 millones de toneladas (49%), junto con 36 millones de toneladas de algas, de las cuales el 97% provino de acuicultura marina (73).

El 89% de los productos acuáticos totales (157 millones de toneladas) se destinó al consumo humano, mientras que 20 millones de toneladas se utilizaron para la elaboración de aceite y harina de pescado (74). En 2020, la pesca de captura alcanzó 90.3 millones de toneladas, con un valor estimado de 141,000 millones de dólares. Por su parte, la acuicultura estableció un récord de 122.6 millones de toneladas, valoradas en 264,800 millones de dólares, incluyendo 87.5 millones de toneladas de animales acuáticos y 35.1 millones de toneladas de algas (73).



*Figura 4. Producción acuícola mundial 1991-2020. Tomado de EL ESTADO MUNDIAL DE LA PESCA Y LA ACUICULTURA. FAO 2022 (73)*

#### **1.6.8 Producción en México de Pesca y Acuicultura**

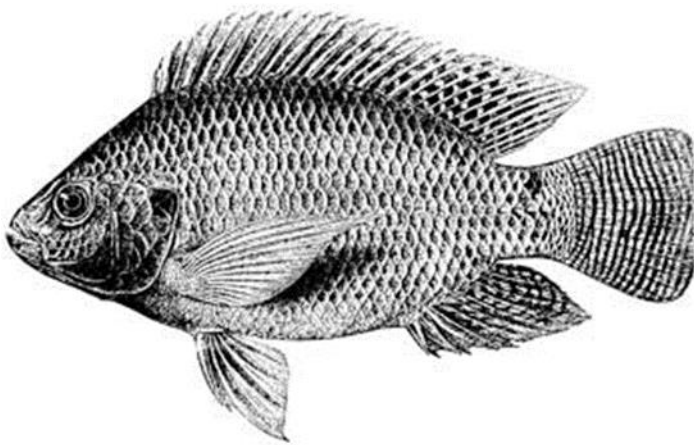
En 2020, la producción acuícola y pesquera en México generó 43,938 millones de pesos. En 2021, este valor aumentó un 7.5%, alcanzando los 47,239 millones de pesos, con un volumen total de 1.98 millones de toneladas, un incremento del 1.6% respecto al año anterior, gracias al aumento en la captura de especies como anchoveta (257 mil toneladas), atún (132 mil toneladas), pulpo (47 mil toneladas) y almeja (26 mil toneladas) (74).

Los estados de la región noroeste de México —Baja California, Baja California Sur, Nayarit, Sinaloa y Sonora— fueron los principales productores en 2021, aportando el 82.4% del volumen nacional (1.63 millones de toneladas) y generando 34,541 millones de pesos, es decir, el 73.1% de la utilidad total. Sonora se destacó en la producción de sardina, mientras que Sinaloa lideró en la captura de atún. Baja California y Baja California Sur se posicionaron como los principales

productores de sardina y Nayarit ocupó el tercer lugar en la producción de camarón (75).

#### **1.6.9 Aprovechamiento para Otras Aplicaciones**

La industria pesquera genera grandes cantidades de desechos, que representan más del 50% del peso del pescado e incluyen partes no aptas para consumo humano como cabezas, escamas, vísceras y capturas no deseadas (16). Estos residuos pueden ser aprovechados para la elaboración de subproductos como harina de pescado, obtenida a partir de las partes sobrantes de especies como la tilapia, y que contiene altos niveles de aminoácidos esenciales y ácidos grasos poliinsaturados, convirtiéndose en un ingrediente proteico de calidad para alimentos pecuarios y piscícolas (74, 75, 76).



*Figura 5. Tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus. Tomado de Revisión literaria: Alternativas alimenticias para la suplementación de Oreochromis Sp (76)*

Por otro lado, los aceites de pescado, extraídos del hígado, piel o espinas, son ricos en DHA y omega-3, compuestos que se utilizan en la elaboración de piensos, productos farmacéuticos y complementos alimenticios por sus beneficios para la salud cardiovascular (79, 80). Adicionalmente, los residuos de pescado también

se aprovechan en la producción de fertilizantes orgánicos como el quitosano, que tiene propiedades antibacterianas y estimula el desarrollo saludable de cultivos, mejorando la estructura y fertilidad del suelo (81, 82, 83).

#### **1.6.9.1 Ventajas del uso de biofertilizantes**

- Reemplazan a los fertilizantes químicos, lo que genera gran beneficio para el medio ambiente.
- Gestiona de manera sostenible los recursos para la producción al consumir menor cantidad de energía.
- Mejoran la productividad de los cultivos.
- Se utilizan los sobrantes orgánicos.
- Mejoran el entorno donde se utilizan, al recuperar la materia orgánica del suelo con lo que se logra la fijación de carbono en este, lo que mejora la capacidad de absorber agua.
- Su aplicación tiene impacto en el medio ambiente, y en la economía, puesto que su precio es más bajo que el de los fertilizantes químicos.
- Incrementan la vida útil del suelo, mejoran su textura, además de mantenerlo en excelentes condiciones de cultivo.

### **1.7 PROBLEMÁTICA DE LA INSEGURIDAD ALIMENTARIA EN EL MUNDO**

Según la FAO, seguridad alimentaria es cuando la población tiene acceso social, físico y económico suficiente a los alimentos, estos no deben de perjudicar la salud, es decir deben de ser inocuos y poseer los nutrientes suficientes para satisfacer las necesidades nutritivas diarias de las personas, que, gracias a estos alimentos, tienen una vida sana y productiva. De no ser así, se sufre de inseguridad alimentaria. Es decir, la inseguridad alimentaria es una situación que sufren las personas que, a consecuencia de no tener una dieta balanceada, no pueden mantener una vida sustentable(65).

La inseguridad alimentaria está presente de forma permanente en muchos países del mundo y depende de distintas causas. En un gran número de estas áreas su principal detonante es la escasez de los recursos hidrológicos, el deterioro de los suelos y los conflictos bélicos que son el resultado de ambos. Además de todo lo anterior no se pueden omitir los efectos que trajo consigo la pandemia mundial por el Covid-19(65).

### ***1.7.1 Escala de Seguridad Alimentaria***

La FIES se fundamenta en una encuesta llamada Escala de la Inseguridad Alimentaria Basada en la Experiencia, se compone de ocho preguntas alusivas al alcance de la población a una alimentación apropiada, estas interrogantes son simples y se consiguen integrar sin dificultades en distintos tipos de medición de la población(66).

A diferencia de otros enfoques tradicionales que miden la inseguridad alimentaria de manera indirecta, tales como la Prevalencia de la Subalimentación de la FAO; la FIES cuantifica los factores determinantes de la seguridad alimentaria, estas causas pueden ser la disponibilidad de alimentos o ingresos y las eventuales consecuencias, de las cuales la más importante es el estado nutricional (66).

Ocho cuestiones concisas son parte de la encuesta, estas preguntas se refirieren a la problemática de un entrevistado de manera particular o de su hogar. Las preguntas antes mencionadas se muestran en la tabla 4 y en la tabla 5 se muestra el ejemplo del significado de inseguridad alimentaria según la FIES(66).

*Tabla 4. Preguntas Escala de la Inseguridad Alimentaria Basada en la Experiencia.*

---

Durante los últimos 12 meses, ha habido algún momento en que, por falta de dinero u otros recursos:

- |                                                                     |                |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1. Se haya preocupado por no tener suficientes alimentos para comer | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 2. No haya podido comer alimentos sanos o nutritivos                | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 3. Haya comido poca variedad de alimentos                           | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 4. Haya tenido que saltarse una comida                              | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 5. Haya comido menos de lo que pensaba que debía comer              | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 6. Su hogar se haya quedado sin alimentos                           | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 7. Haya sentido hambre, pero no comió                               | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
| 8. Haya dejado de comer durante todo un día                         | 4 No           |
|                                                                     | 4 Si           |
|                                                                     | 98 No sabe     |
|                                                                     | 99 No responde |
- 

*Tabla 5* Significado de inseguridad alimentaria según la FIES

---

**Incertidumbre acerca Seguridad alimentaria a inseguridad alimentaria leve**

**de la capacidad de**

**obtener alimentos**

---

---

Se pone en riesgo la **Inseguridad alimentaria moderada:**

calidad de los alimentos  
y la variedad de los  
alimentos se encuentra  
comprometida

- La persona no cuenta con los recursos o dinero suficientes para poder llevar una dieta adecuada.
- Se tiene incertidumbre acerca de la capacidad para obtener alimentos.
- Existe la posibilidad de que se haya omitido una comida o se haya quedado sin alimentos ocasionalmente.

Se reduce la cantidad **Inseguridad alimentaria moderada:**

de alimentos, se saltan Esta persona:

comidas

- No tiene dinero o recursos suficientes para llevar una dieta saludable.
- Tiene incertidumbre acerca de la capacidad para obtener alimentos.
- Es probable que se haya saltado una comida o se quede sin alimentos ocasionalmente.

No se consumen **Inseguridad alimentaria grave:**

alimentos durante un Esta persona:

día o más

- Se queda sin alimentos.
- Estuvo todo un día sin comer varias veces durante el año.

---

El presente trabajo aborda la implementación de un secador solar como una alternativa sostenible y eficiente para la deshidratación de productos marinos. La relevancia de esta investigación radica en su potencial para reducir el desperdicio

alimentario y mejorar la seguridad alimentaria en comunidades rurales y costeras con acceso limitado a tecnologías de conservación. A diferencia de los métodos convencionales, el secado solar utiliza energía renovable, lo que disminuye los costos operativos y minimiza el impacto ambiental, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías más limpias y accesibles para el sector pesquero y agrícola.

A nivel global, la creciente demanda de alimentos y la sobreexplotación de los recursos marinos exigen soluciones tecnológicas que optimicen el aprovechamiento de las capturas y transformen los residuos pesqueros en subproductos de valor agregado. La aplicación de tecnologías de secado solar puede mejorar significativamente la calidad y durabilidad de los productos pesqueros, promoviendo la diversificación de productos y aumentando el valor comercial de especies de menor tamaño o con menor demanda. Además, el secado solar es adaptable a diferentes escalas de producción, desde pequeños productores artesanales hasta industrias de mayor capacidad, lo que permite su implementación en diversos contextos productivos.

Por lo tanto, esta investigación no solo se centra en desarrollar un sistema de secado solar eficiente, sino también en demostrar cómo esta tecnología puede integrarse en la cadena de suministro de productos marinos para maximizar la sostenibilidad y la rentabilidad de la producción pesquera. Los resultados de este proyecto tienen el potencial de contribuir al fortalecimiento económico de las comunidades pesqueras, mejorar la calidad de vida de los productores y generar un impacto positivo en la conservación de los recursos marinos a largo plazo.

## **1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La tesis se divide en 8 capítulos, el primer capítulo aborda la introducción, donde se destaca la importancia del estudio de técnicas de secado para aplicación a productos marinos. Se hace una revisión del estado del arte en secado solar de productos marinos y se aborda el marco teórico que sustenta la parte experimental de la tesis. Principalmente, la descripción del funcionamiento del secador solar, los parámetros que caracterizan el secador solar y las variables que describen la evolución del secado de los productos marinos.

En el segundo capítulo se realiza el planteamiento del problema, se determina cual es la trascendencia del problema y porque es relevante desde la óptica de estudios transdisciplinarios. En el tercer capítulo se plantea la hipótesis y objetivos de la tesis. En el cuarto capítulo se describe el objetivo general y los objetivos particulares de la tesis. En el quinto capítulo se desarrolla a detalle la metodología empleada para la construcción e instrumentación del secador solar, así como de los parámetros y condiciones climáticas evaluadas durante el proceso de secado. Se describen los aparatos de medición y los métodos de análisis de los datos obtenidos en este estudio.

En el sexto capítulo se presentan los resultados más relevantes de la tesis y en el séptimo capítulo se hace una discusión de estos. Finalmente, en el octavo capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y se hacen recomendaciones para trabajos futuros.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El presente trabajo aborda la implementación de un secador solar como una alternativa sostenible y eficiente para la deshidratación de productos marinos. La relevancia de esta investigación radica en su potencial para reducir el desperdicio alimentario y mejorar la seguridad alimentaria en comunidades rurales y costeras con acceso limitado a tecnologías de conservación. A diferencia de los métodos convencionales, el secado solar utiliza energía renovable, lo que disminuye los costos operativos y minimiza el impacto ambiental, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías más limpias y accesibles para el sector pesquero y agrícola.

A nivel global, la creciente demanda de alimentos y la sobreexplotación de los recursos marinos exigen soluciones tecnológicas que optimicen el aprovechamiento de las capturas y transformen los residuos pesqueros en subproductos de valor agregado. La aplicación de tecnologías de secado solar puede mejorar significativamente la calidad y durabilidad de los productos pesqueros, promoviendo la diversificación de productos y aumentando el valor comercial de especies de menor tamaño o con menor demanda. Además, el secado solar es adaptable a diferentes escalas de producción, desde pequeños productores artesanales hasta industrias de mayor capacidad, lo que permite su implementación en diversos contextos productivos.

Por lo tanto, esta investigación no solo se centra en desarrollar un sistema de secado solar eficiente, sino también en demostrar cómo esta tecnología puede integrarse en la cadena de suministro de productos marinos para maximizar la sostenibilidad y la rentabilidad de la producción pesquera. Los resultados de este

proyecto tienen el potencial de contribuir al fortalecimiento económico de las comunidades pesqueras, mejorar la calidad de vida de los productores y generar un impacto positivo en la conservación de los recursos marinos a largo plazo.

## **2.1 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de un secador solar adaptado para la conservación de productos marinos es crucial debido a la alta perecibilidad de estos alimentos y la falta de tecnologías de conservación accesibles en comunidades rurales y costeras. Los métodos convencionales, como la refrigeración, no son viables en estas zonas debido a su elevado costo y la falta de infraestructura energética, lo que provoca un alto desperdicio de alimentos y pérdidas económicas para los productores locales.

Un secador solar eficiente permitiría prolongar la vida útil de los productos marinos, manteniendo su calidad y generando un impacto positivo en la seguridad alimentaria y en el desarrollo económico de las comunidades. Al utilizar energía solar, esta tecnología reduciría los costos operativos y promovería la sostenibilidad. Además, su diseño adaptado a las características específicas de los productos marinos ofrecería una solución innovadora que contribuiría a mejorar la calidad de vida de los pescadores, fortaleciendo la cadena de valor y promoviendo prácticas sostenibles en la conservación de alimentos.

## **3 HIPÓTESIS**

El diseño, construcción e instrumentación de un secador solar adaptado a las características de los productos marinos favorece la calidad final del producto,

reduce los tiempos de secado y aumenta la eficiencia energética del proceso, contribuyendo a la seguridad alimentaria.

## **4 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir, Instrumentar y controlar la temperatura y humedad de un secador solar pasivo, mejorando la eficiencia del proceso, la calidad del producto final.

### **4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Análisis de parámetros, criterios y condiciones más relevantes para el diseño y fabricación de secadores solares pasivos.
- Diseño de un secador solar pasivo alineado a los criterios de diseño constructivo.
- Construcción de un secador solar con policarbonato y elementos constructivos
- Instrumentar el secador solar con sensores de temperatura y humedad para monitorear y controlar el proceso de secado.
- Analizar la eficiencia energética del secador solar y su impacto en la reducción de costos en comparación con métodos tradicionales.
- Evaluar la cinética de secado y la actividad de agua en los productos propuestos.
- Revisión de parámetros de calidad del producto final

## **5 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 ETAPA DE DISEÑO**

La etapa de diseño se desarrolló con el objetivo de definir los parámetros estructurales y funcionales del secador solar. Esta etapa se subdivide en cinco subetapas para organizar de manera clara y secuencial la planificación del proyecto, asegurando que todas las especificaciones técnicas se contemplen antes de la construcción.

#### ***5.1.1 Definición de Requerimientos del Secador Solar***

En esta subetapa se identificaron las características específicas del secador solar en función de las propiedades de los productos a deshidratar y el entorno de operación. Se establecieron los siguientes requerimientos:

**Análisis del Producto Para Deshidratar:** Se realizó un estudio de las propiedades fisicoquímicas de los productos marinos (contenido de humedad, composición nutricional y características térmicas) para determinar las condiciones óptimas de secado. Esto incluyó la identificación del contenido de humedad inicial y el contenido deseado en el producto final, así como su sensibilidad a la temperatura para evitar degradación nutricional.

El contenido de humedad inicial de la mayoría de los productos a secar es de 75% y se tiene como objetivo llegar a una humedad del 10% o menor. La densidad del producto en promedio es de 1180 kg/m<sup>3</sup> y el espesor de la rebanada a deshidratar es de aproximadamente 5 mm.

Determinación de la masa seca del pescado:

Se calcula la masa inicial del pescado. Para ello se utiliza la humedad en base húmeda y el volumen de la rebanada:

Datos iniciales:

- **Humedad inicial** ( $X_{bh-inicial}$ ): 75% (base húmeda).
- **Humedad final** ( $X_{bh-final}$ ): 10% (base húmeda).
- **Densidad del pescado** ( $\rho$ ): 1180 kg/m<sup>3</sup>.
- **Espesor de la rebanada** ( $e$ ): 5 mm = 0.005 m.
- **Área del secador** ( $A$ ): Se calculará a partir del volumen requerido.

Cálculo de la masa seca:

$$X_{bs-inicial} = \frac{X_{bh-inicial}}{1 - X_{bh-inicial}} = \frac{0.75}{1 - 0.75} = 3$$
$$m_{seco} = \frac{A \times e \times \rho}{1 + X_{bs-inicial}} = \frac{1 \times 0.005 \times 1180}{1 + 3} = \frac{5.9}{4} = 1.475 \text{ kg}$$

Donde:

Volumen es  $A \times e$  (área por espesor)

Determinación del agua a evaporar

El agua para evaporar ( $m_{agua}$ ) se determina como la diferencia entre la masa de agua inicial y la masa de agua final del producto.

$$M_{agua} = m_{seco} \times (X_{bs-inicial} - X_{bs-final})$$

Donde:

$$X_{bs-final} = \frac{X_{bh-final}}{1 - X_{bh-final}} = \frac{0.10}{1 - 0.10} = 0.11$$

Energía necesaria para evaporación de agua

Usamos la ecuación de balance energético para determinar la energía (Q) requerida:

$$Q = m_{agua} \times \lambda$$

Donde:

$\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua, que es aproximadamente 2257 kJ/kg.

Resultados de los cálculos basados en un área de referencia de 1 m<sup>2</sup> y el espesor de la rebanada de 5 mm, lo que equivale a aproximadamente 5.9 kg de pescado húmedo inicial (considerando la densidad de 1180 kg/m<sup>3</sup> y el volumen calculado:

1. Masa seca inicial del pescado:  $m_{seco}=1.475\text{kg}$
2. Cantidad de agua a evaporar:  $m_{agua}=4.261\text{kg}$
3. Energía necesaria para la evaporación:  $Q=9617.33\text{kJ}$

Esto significa que, para reducir la humedad del pescado de un 75% a un 10% en una rebanada con las características dadas, se requiere aproximadamente 9617.33 kJ de energía.

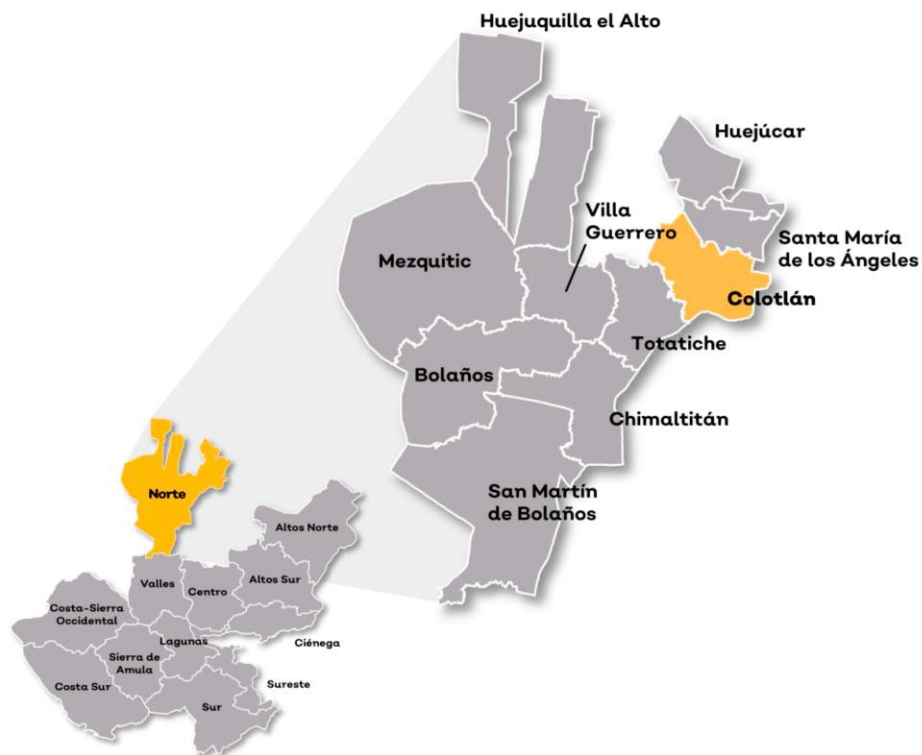
Para fines prácticos y considerando que será complicado utilizar exactamente todo el metro cuadrado sin dejar espacios entre el producto a secar, se decidió disminuir la cantidad a secar de 5.9 kilos de pescado para cada metro cuadrado de área del secador, por lo que, para 15 kg, los resultados serían:

Masa seca inicial para 15 kg de pescado húmedo:  $m_{seco}=3.75\text{ kg}$

Cantidad de agua a evaporar:  $m_{agua}=10.83\text{ kg}$

Energía necesaria para la evaporación:  $Q=24,450.83\text{ kJQ}$

Se pretende alcanzar una temperatura mínima de 65 °C. Las condiciones climáticas del sitio de operación (Colotlán, Jalisco, ver Figura 2) son las siguientes: La mayor parte del municipio tiene un clima semicálido semihúmedo. La temperatura media anual es de 18.3 °C, y su temperatura mínima y máxima promedio oscila entre los 6.3°C y 31.3 °C. La precipitación media anual es de 717 milímetros (mm) mientras que la precipitación promedio acumulada es de 580.10 mm.



*Figura 2. Mapa General del Estado de Jalisco, 2012. Fuente: Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco.*

**Selección del Tipo de Secador:** En función de los análisis, se seleccionó el diseño de un secador solar mixto que combina las ventajas de un sistema directo e indirecto para maximizar la eficiencia de secado y evitar la exposición directa a los rayos UV, protegiendo las características organolépticas del producto.

Dimensionamiento del Sistema: Se calcularon las dimensiones del secador basadas en el volumen de producto a procesar por ciclo y en la tasa de secado estimada. Se determinó que el sistema debe tener una superficie de secado de 3 m<sup>2</sup> para asegurar una capacidad de carga de aproximadamente 15 kg de producto húmedo por ciclo de deshidratación.

### ***5.1.2 Análisis de Transferencia de Calor y Energía***

En esta subetapa se llevaron a cabo los cálculos necesarios para estimar la energía requerida para el secado y el diseño de los colectores solares:

Determinación de Parámetros Energéticos: Se recopilaron datos climáticos de la región de Campeche, México, para determinar la radiación solar promedio disponible y la variabilidad de la temperatura ambiente. Se obtuvo que la radiación solar disponible oscila entre 4.5 y 5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día, valores que permiten la viabilidad del uso de energía solar para el secado.

Cálculo de la Energía Necesaria: Se utilizó la ecuación de balance energético para estimar la cantidad de energía necesaria para evaporar el contenido de agua del producto, considerando la capacidad de absorción del colector y las pérdidas de calor.

Los cálculos realizados para determinar si el sistema de secado solar, compuesto por un secador solar directo y un colector de aire, es suficiente para secar 15 kg de pescado en las condiciones climáticas de Colotlán. Se consideran dos escenarios: radiación solar mínima de 4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día y radiación solar máxima de 5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día.

### **Datos Iniciales**

Los datos considerados para el cálculo de la energía necesaria y la energía generada por el sistema son los siguientes:

- Masa de pescado húmedo a secar: 15 kg
- Humedad inicial del pescado: 75%
- Humedad final del pescado: 10%
- Calor latente de vaporización del agua: 2257 kJ/kg
- Radiación solar en Colotlán:
  - Mínima: 4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día
  - Máxima: 5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día
- Área del colector de aire: 2.52 m<sup>2</sup>
- Área del secador solar directo: 3 m<sup>2</sup>
- Eficiencia del colector de aire: 35.17%
- Eficiencia del secador solar directo: 30%
- Temperatura ambiente: 30°C
- Temperatura de salida del aire del colector: 65°C
- Tiempo de exposición: 7 horas/día.

### **Cálculo de la Energía Necesaria**

Para secar 15 kg de pescado con una humedad inicial de 75% a un contenido final de 10%, se requiere evaporar la cantidad de agua contenida en el producto. La energía necesaria se calcula considerando el calor latente de vaporización del agua y la masa de agua a evaporar.

#### ***Masa de agua a evaporar:***

$$m_{\text{agua}} = \text{masa seca} \times (X_{\text{bs\_inicial}} - X_{\text{bs\_final}})$$

$$m_{\text{agua}} = 3.75 \text{ kg} \times (3.0 - 0.11) \approx 10.83 \text{ kg}$$

***Energía necesaria:***

$$Q = m_{\text{agua}} \times \lambda$$

$$Q = 10.83 \text{ kg} \times 2257 \text{ kJ/kg} \approx 24,450.83 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, la energía necesaria para secar 15 kg de pescado es 24,450.83 kJ.

**Energía Generada por el Colector de Aire y el Secador Solar Directo**

El sistema combinado está compuesto por un colector de aire con un área de 2.52 m<sup>2</sup> y un secador solar directo con un área de 3 m<sup>2</sup>. La energía generada depende de la radiación solar y la eficiencia de cada componente.

Energía generada por el colector de aire:

Radiación solar mínima (4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día) y máxima (5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día) se convierten a kJ:

$$\text{Radiación mínima: } 4.5 \text{ kWh/m}^2 \times 3600 \text{ kJ/kWh} = 16,200 \text{ kJ/m}^2$$

$$\text{Radiación máxima: } 5.8 \text{ kWh/m}^2 \times 3600 \text{ kJ/kWh} = 20,880 \text{ kJ/m}^2$$

Energía generada (colector de aire):

$$\text{Energía mínima: } 16,200 \text{ kJ/m}^2 \times 2.52 \text{ m}^2 \times 0.3517 \approx 14,357.98 \text{ kJ}$$

$$\text{Energía máxima: } 20,880 \text{ kJ/m}^2 \times 2.52 \text{ m}^2 \times 0.3517 \approx 18,505.83 \text{ kJ}$$

Energía generada por el secador solar directo:

$$\text{Energía mínima: } 16,200 \text{ kJ/m}^2 \times 3 \text{ m}^2 \times 0.30 \approx 14,580 \text{ kJ}$$

$$\text{Energía máxima: } 20,880 \text{ kJ/m}^2 \times 3 \text{ m}^2 \times 0.30 \approx 18,792 \text{ kJ}$$

Energía total generada por el sistema (mínima y máxima):

$$\text{Mínima: } 14,357.98 \text{ kJ} + 14,580 \text{ kJ} \approx 28,937.98 \text{ kJ}$$

$$\text{Máxima: } 18,505.83 \text{ kJ} + 18,792 \text{ kJ} \approx 37,297.83 \text{ kJ}$$

## **Comparación de la Energía Necesaria y la Energía Generada**

La energía necesaria para el secado es 24,450.83 kJ. Comparando con la energía generada:

- Con radiación mínima (4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día): La energía generada es 28,937.98 kJ, por lo tanto, el sistema es suficiente para secar los 15 kg de pescado en un solo día.

- Con radiación máxima (5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día): La energía generada es 37,297.83 kJ, lo que garantiza que el secado se complete en menos de un día.

Con base en los anteriores resultados se procedió a realizar el diseño del equipo.

### **5.1.3 Generación de Bocetos y Planos del Prototipo**

Una vez definidos los parámetros de diseño y selección de materiales, se generaron los planos y bocetos del secador solar:

Se elaboraron los planos detallados con las dimensiones finales del prototipo, incluyendo vistas frontal, lateral y superior. Estos planos detallan la ubicación de cada componente, el recorrido del flujo de aire y la posición de los sensores.

Se incluyeron diagramas de flujo de aire y de la distribución de las bandejas para ilustrar el proceso interno.

Se desarrollaron esquemas de las conexiones de los sistemas eléctricos, incluyendo los sensores de temperatura, los ventiladores y los módulos de control para el monitoreo en tiempo real de las condiciones de secado.

El diseño del secador solar se dibujó en etapas, comenzando con bocetos con dimensiones preliminares y posteriormente, fue realizado en el software AutoCAD

2023. Los detalles de los planos, dibujos y selección de materiales se encuentran en el ANEXO I.

#### **5.1.4 *Diseño del Sistema de Flujo de Aire***

En esta subetapa se diseñó el sistema de circulación de aire dentro del secador para garantizar un secado homogéneo y controlar la humedad relativa en el proceso:

Flujo de Aire Natural o Forzado: Se evaluaron las ventajas del flujo de aire forzado mediante ventiladores, los cuales permiten mantener un flujo constante y controlado. Se decidió implementar un sistema mixto, utilizando ventiladores de baja potencia alimentados por energía solar para optimizar el consumo energético.

Diseño de Conductos de Aire: Se dimensionaron los conductos de entrada y salida del aire para mantener una velocidad de flujo de 1.5 m/s, lo que permite un secado uniforme en toda la cámara. La entrada de aire se ubicó en la parte inferior, mientras que la salida de aire húmedo se dispuso en la parte superior para facilitar la convección natural.

### **5.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN**

La etapa de construcción abarca la materialización del diseño previamente definido, integrando cada uno de los componentes estructurales, térmicos y de control necesarios para la operación eficiente del secador solar. Esta fase se lleva a cabo en varias subetapas que aseguran la correcta implementación del sistema,

garantizando que las especificaciones de diseño se traduzcan en un prototipo funcional.

### **5.2.1 Selección de Materiales**

En esta subetapa, se adquirieron todos los materiales necesarios, tanto para la estructura física del secador como para los sistemas auxiliares de instrumentación y control. La selección se basó en criterios de durabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad de transmisión térmica. Los materiales principales fueron:

Estructura: Acero solera de acero para la estructura principal, con perfiles tubulares de sección rectangular (PTR) de 1 pulgada de espesor, para proporcionar rigidez y estabilidad.

Superficies de secado: Mallas de acero inoxidable, seleccionadas por su capacidad para soportar altas temperaturas sin deformarse ni corroerse.

Revestimientos y Aislamiento: Poliuretano expandido de alta densidad (para el aislamiento térmico) y pintura epóxica con recubrimiento UV (para proteger la estructura contra la intemperie).

### **5.2.2 Preparación y Corte de Componentes**

Los componentes fueron preparados mediante cortes específicos para asegurar la compatibilidad entre las piezas estructurales y los paneles de colectores. Las dimensiones se ajustaron de acuerdo con los planos de diseño previamente elaborados:

Corte de Estructuras: El acero solera de acero se cortó en secciones de 2 m de largo y 1 m de ancho, para ensamblar la base y los laterales del secador.

Corte de Superficies de Secado: Las mallas de acero inoxidable se cortaron para adaptarse a las bandejas modulares de 1 m<sup>2</sup>, permitiendo un montaje y desmontaje rápido.

En la Figura 3 se muestran las etapas de construcción de la estructura del secador solar, donde se contempla el proceso de elaboración de la base metálica que soporta al colector y está constituida por perfil metálico PTR de 1  $\frac{1}{2}$  pulgadas.

En la Figura 4 se puede ver la estructura metálica que conforma la cámara de secado que está conformada con perfil metálico PTR de  $\frac{3}{4}$  de pulgadas y además se observa también la cámara de secado elaborada a base de policarbonato.



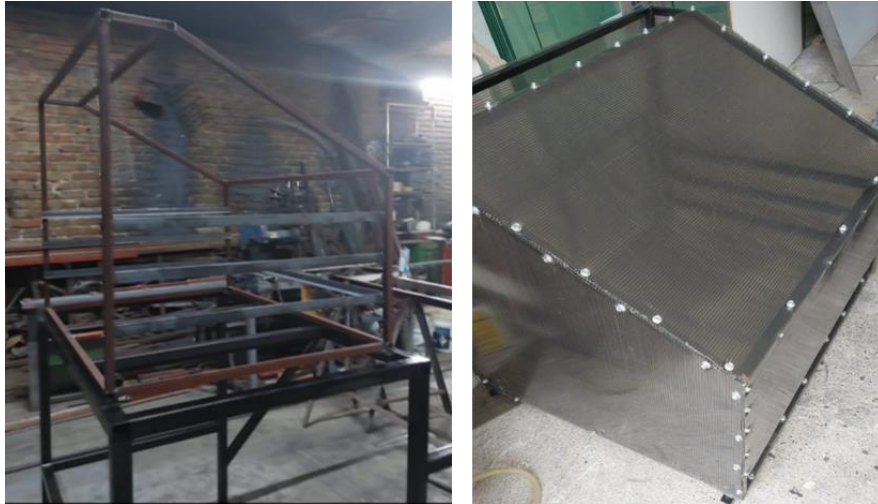
*Figura 3. Base metálica que soporta al colector del secador solar. Elaboración propia*

### **5.2.3 Ensamblaje de la Estructura**

El ensamblaje de la estructura se realizó en las siguientes etapas:

Montaje de la Base y Paredes Laterales:

La estructura base se soldó con perfiles de acero solera de acero para formar un marco rígido. Los laterales se unieron utilizando tornillos de acero inoxidable, permitiendo ajustes de alineación.

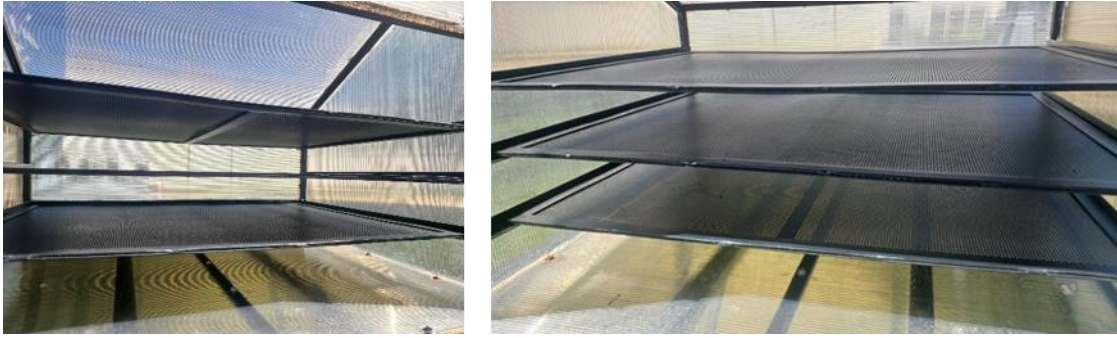


*Figura 4. Base metálica completa del secador solar y cámara de secado. Elaboración propia*

Las tres charolas que están colocadas dentro de la cámara de secado fueron elaboradas a base de hoja metálica calibre 14 con perforaciones de 3mm. Las dimensiones de las charolas son de 0.95m x 0.66m con marco de solera calibre 14, pintadas en color negro mate. En la Figura 5 se muestran el material del cual fueron hechas las charolas y el producto terminado respectivamente. En la Figura 6 se pueden observar las charolas colocadas dentro de la cámara de secado.



*Figura 5. Hoja metálica calibre 14. y Charolas terminadas. Elaboración propia*



*Figura 6. Charolas dentro de la cámara de secado. Elaboración propia.*

#### Instalación del Colector Solar:

El colector solar de aire se instaló en la parte inferior del secador para maximizar la captación de radiación solar y permitir un flujo de aire ascendente (ver Figura 7). Se conectó con ductos de aire a la cámara de secado.

El colector solar, tiene las siguientes características:

1. Ancho, 120 cm
2. Largo, 150 cm
3. Espesor, 9 cm
4. Peso, 28 kg
5. Cubierta de vidrio prismático
6. Absorbedor de aluminio
7. Superficie Selectiva color negro



*Figura 7. Colector solar utilizado.*

#### 5.2.4 Integración de la Cámara de Secado

Las bandejas de secado (4 niveles en total) se colocaron dentro de la cámara de secado, asegurando un flujo de aire uniforme entre las rebanadas de pescado.

Para el diseño de la cámara de secado se comenzó con calcular sus dimensiones. Posteriormente se eligió el material del cuál sería fabricado, se consideraron las características de la Tabla 2.

*Tabla 2. Características de los materiales constructivos.*

| Material             | Características                                                                                                                                |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Acrílico</b>      | Resistente a los rayos UV Alta claridad óptica Resistente al rayado. Se puede usar hasta 87°C Sensibles a los productos químicos               |
| <b>Polycarbonato</b> | Resistente a los rayos UV Buena claridad óptica. Alta resistencia a los impactos. Tolerante a temperaturas extremas. Resistente a los químicos |

#### 5.2.5 Selección de ventilador

- El ventilador es el equipo necesario para aumentar el flujo de aire del sistema, el mismo consta de tres componentes básicos que son: armazón, motor y hélices.
- El objetivo de la selección de un ventilador es, elegir aquel que satisfaga los requisitos de caudal y presión de aire, necesarios para un sistema, para la temperatura de operación, altitud de la instalación.

#### 5.2.6 Métodos de Medición y Control

Para asegurar un control preciso de las variables críticas durante el proceso de secado solar de pescado, se seleccionaron diferentes instrumentos de medición, considerando la viabilidad económica, la precisión de los dispositivos y la

capacidad de integración con el sistema de adquisición de datos basado en Arduino. La implementación de sensores electrónicos y la programación de módulos de control permitieron monitorear en tiempo real las variables de temperatura, humedad relativa y flujo de aire, facilitando la automatización del sistema y la recolección de datos para el análisis del proceso.

### **5.2.7 Sensores de Temperatura**

La temperatura es una variable esencial en el secado, ya que determina la velocidad de evaporación del agua y la estabilidad térmica dentro de la cámara de secado. Para su medición, se emplearon termopares tipo K y sensores digitales DHT22. Los termopares tipo K fueron seleccionados debido a su amplio rango de operación ( $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1350^{\circ}\text{C}$ ), alta precisión y rápida respuesta, lo que los hace ideales para monitorear la temperatura de salida del aire del colector y la temperatura dentro de la cámara de secado. Además, su capacidad para resistir altas temperaturas garantiza mediciones confiables incluso en condiciones severas de operación.

Por otro lado, el sensor DHT22 fue utilizado para la monitorización de la temperatura ambiente en la entrada del sistema, ya que su integración con Arduino es sencilla y proporciona tanto la temperatura como la humedad relativa en un solo módulo. Su rango de operación de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  y su precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  permiten una caracterización detallada de las condiciones ambientales externas.

### **5.2.8 Sensores de Humedad Relativa**

La humedad relativa es un parámetro crítico para evaluar la eficiencia del proceso de secado, ya que la cantidad de vapor de agua presente en el aire influye directamente en la velocidad de deshidratación del producto. Se seleccionaron sensores DHT22 y módulos AM2301 para esta medición. El DHT22, además de medir la temperatura, proporciona datos de humedad con una precisión de  $\pm 2\%$

para el rango de 0% a 100% de humedad relativa, lo que asegura un control preciso de las condiciones del aire en el interior de la cámara de secado.

El módulo AM2301 se instaló en la salida de la cámara de secado para verificar el contenido de humedad en el aire que abandona el sistema. Este sensor fue elegido por su fácil interfaz con Arduino y su estabilidad a largo plazo, lo cual es importante para monitoreos prolongados. La combinación de estos sensores en puntos estratégicos dentro y fuera de la cámara permite un control integral de la dinámica de secado.

### ***5.2.9 Control y Monitoreo con Arduino***

La implementación de Arduino como el sistema central de control se debió a su flexibilidad, facilidad de programación y capacidad para manejar múltiples entradas y salidas de datos en tiempo real. Arduino actúa como el cerebro del sistema, recibiendo las señales de los termopares y sensores de humedad, procesando la información y ajustando las condiciones de operación del secador. Además, se utilizó un shield de termopares MAX6675 para la conversión de señales analógicas a digitales de los termopares, permitiendo una lectura precisa y estable.

El uso de Arduino también facilitó la integración de módulos de registro de datos, como la tarjeta SD, y la implementación de un control automático de los ventiladores, ajustando el flujo de aire en función de la temperatura interna para optimizar la distribución del calor. Esta configuración permite un monitoreo constante y una capacidad de ajuste en tiempo real, lo que asegura condiciones ideales para el secado y minimiza las variaciones de temperatura y humedad durante el proceso.

### **5.2.10 Validación de los Instrumentos**

Antes de su implementación definitiva, cada uno de los sensores fue sometido a pruebas de calibración utilizando un termohigrómetro de referencia, lo que permitió asegurar la precisión de las lecturas y ajustar las desviaciones detectadas. Además, se realizaron pruebas de estabilidad a diferentes temperaturas para validar que las lecturas no presentaran errores significativos debido a variaciones bruscas en las condiciones ambientales.

### **5.2.11 Protocolo Experimental**

La experimentación se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el desempeño del secador solar para deshidratar distintos productos marinos, entre los que se incluyeron pescado entero, camarón y desperdicios de pescado. Cada tipo de producto presentó características fisicoquímicas particulares que influyen en su proceso de secado, como el contenido inicial de humedad, el tamaño de las muestras y la tasa de secado. A continuación, se describe de manera detallada el procedimiento experimental implementado.

#### ***1. Selección y Preparación de las Muestras***

Las muestras se obtuvieron del mercado local de Colotlán, Jalisco, para garantizar la frescura y homogeneidad de los productos. Los tres tipos de productos utilizados fueron:

1. Filetes de pescado entero (Tilapia): Se seleccionaron filetes con un peso promedio de 150 g y un espesor aproximado de 5 mm. Los filetes fueron acondicionados eliminando la piel y las escamas, para asegurar uniformidad en las condiciones de secado.
2. Camarón crudo: Se adquirió camarón de tamaño mediano, con un peso promedio de 25 g por unidad. Los camarones fueron desvenados y se les

retiró la cabeza, manteniendo la cáscara para conservar su estructura durante el proceso de secado.

3. Desperdicios de pescado: Este grupo incluyó restos de piel, vísceras y espinas, con un contenido de humedad inicial más elevado. Se seleccionaron muestras de aproximadamente 200 g para mantener una relación homogénea entre las pruebas.

Todas las muestras fueron pesadas y medidas antes de iniciar el proceso de secado para determinar su contenido de humedad inicial y establecer un control de las condiciones de cada experimento.

## *2. Condiciones Iniciales y Variables Controladas*

Durante el proceso de secado, se controlaron las siguientes variables:

- Temperatura interna del secador solar: Monitoreada en tiempo real con los sensores de temperatura tipo K colocados en la entrada y salida de la cámara de secado.
- Humedad relativa: Registrada a intervalos regulares con sensores DHT22 para asegurar que las condiciones internas fueran estables y reproducibles.
- Flujo de aire: Regulada mediante ventiladores de baja potencia instalados en el colector de aire. La velocidad del flujo de aire fue ajustada para evitar el sobrecalentamiento de las muestras.

## *3. Diseño Experimental*

Se diseñaron tres series experimentales independientes para evaluar el secado de cada tipo de producto bajo las mismas condiciones de radiación solar, humedad relativa y temperatura ambiente:

### 1. Serie 1: Filetes de pescado entero

- Cantidad total: 5 kg de filetes distribuidos en tres bandejas del secador solar.
- Objetivo de secado: Reducir la humedad inicial (aproximadamente 75%) a un contenido de humedad final del 10% en base húmeda.

### 2. Serie 2: Camarón

- Cantidad total: 3 kg de camarón, distribuidos en dos bandejas.
- Objetivo de secado: Alcanzar una humedad final de aproximadamente 12%.

### 3. Serie 3: Desperdicios de pescado

- Cantidad total: 2 kg de desperdicios distribuidos en una sola bandeja.
- Objetivo de secado: Reducir la humedad inicial (~80%) a un 15% para minimizar el volumen y facilitar su manejo posterior.

Cada serie se llevó a cabo de manera independiente, manteniendo la cámara del secador cerrada para evitar interferencias externas. La posición de las bandejas dentro del secador se rotó cada 2 horas para asegurar un secado homogéneo.

### *4. Monitoreo y Registro de Datos*

Durante la experimentación, se implementó un sistema de monitoreo continuo con Arduino, registrando la evolución de las variables a intervalos de 15 minutos:

- Temperatura: Se midió en cuatro puntos distintos (entrada del colector, salida del colector, cámara de secado y salida de aire) para verificar la uniformidad de la distribución térmica.

- Humedad relativa: Registrada dentro de la cámara de secado y en la salida de aire, para evaluar la capacidad del sistema de retirar el vapor generado.
- Peso de las muestras: Cada 2 horas se retiraban las bandejas para pesar las muestras y determinar la pérdida de humedad.

Los datos recolectados se almacenaron en una tarjeta SD para su posterior análisis.

### *5. Análisis de Resultados y Comparación*

Al finalizar cada serie experimental, las muestras fueron evaluadas para determinar su contenido de humedad residual y su calidad organoléptica. Los valores obtenidos se compararon con los métodos de secado tradicionales utilizados en la región, analizando aspectos como la uniformidad del secado, cambio de color, y conservación de propiedades nutricionales.

Para cada tipo de producto, se generaron curvas de secado que muestran la evolución de la humedad en función del tiempo. Estas curvas permitieron identificar las etapas críticas del proceso (periodo de secado constante y periodo de caída de la tasa de secado) y optimizar las condiciones de operación del secador.

## **6 RESULTADOS**

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos durante el desarrollo y la evaluación del secador solar diseñado específicamente para la conservación de productos marinos. Se analizan los datos recolectados a lo largo de las pruebas experimentales, los cuales incluyen el comportamiento de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad de secado y la calidad final de los productos tratados. Cada uno de estos parámetros se evaluó con el objetivo de determinar

la eficiencia del sistema, su capacidad para mantener la calidad nutricional y sensorial de los alimentos, así como su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas.

Los resultados se organizan en función de las etapas experimentales y se comparan con estudios previos, evidenciando el rendimiento del secador solar frente a métodos convencionales de secado. Además, se presentan gráficos y tablas que ilustran la cinética de secado y la relación entre las variables controladas, lo que permite establecer conclusiones sobre la viabilidad y ventajas del uso de esta tecnología en comunidades pesqueras con recursos limitados.

## **6.1 CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR**

El diseño y la construcción del secador solar se basaron en un proceso detallado de cálculo de dimensiones y selección de materiales, con el fin de asegurar un rendimiento óptimo y una alta durabilidad del equipo en condiciones reales de operación. Se determinaron las dimensiones ideales para maximizar la captación de energía solar y permitir un flujo de aire adecuado, garantizando una eliminación uniforme de la humedad en los productos marinos. Además, se realizó un análisis exhaustivo de los materiales, optando por componentes que ofrezcan alta resistencia a la corrosión y a la exposición prolongada a la radiación UV, así como un costo accesible para su implementación en comunidades rurales. A continuación, se presenta una serie de imágenes que ilustran el proceso de construcción y finalización de un secador solar mixto, desarrollado como parte de una tesis de maestría. Las Figura 8, Figura 9 y Figura 10, muestran diferentes etapas del ensamblaje y la estructura final del dispositivo. Estas imágenes sirven

como un registro visual detallado del diseño, los materiales utilizados y el resultado final del secador solar, que ha sido cuidadosamente elaborado para optimizar la eficiencia en la deshidratación de productos mediante energía solar y un apoyo energético complementario.

Cada figura destaca un aspecto importante de la construcción, proporcionando una comprensión completa del proyecto y su funcionalidad en un contexto de aprovechamiento energético sostenible.



a)



b)



c)



d)

*Figura 8. Secador solar terminado, con el equipo de trabajo.*



a)



b)



c)



d)

*Figura 9. Fotografías ilustrativas del secador solar.*



a)



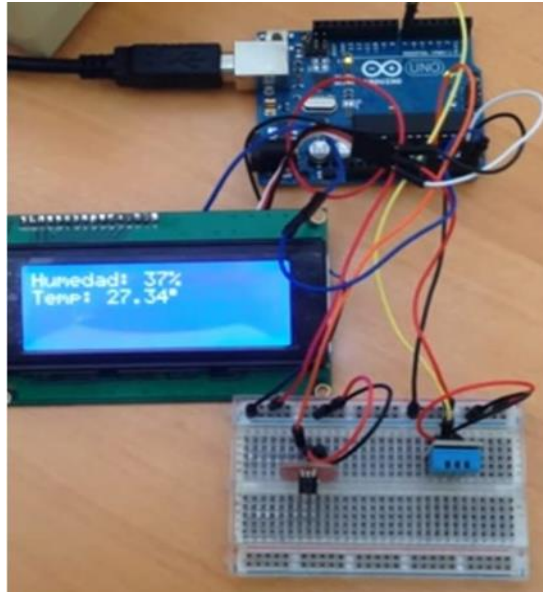
b)

*Figura 10. Tomas laterales del secador solar terminado.*

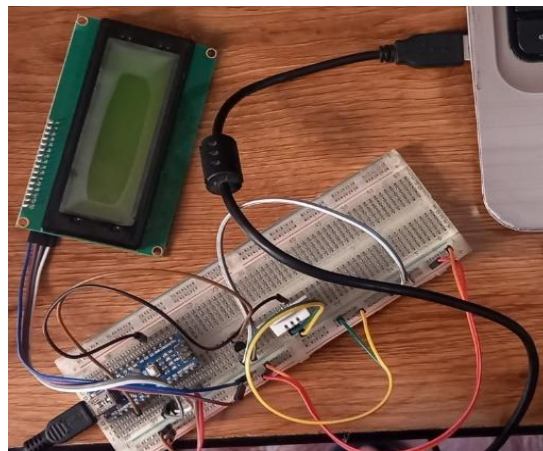
## 6.2 INSTRUMENTACIÓN DEL SECADOR SOLAR

La instrumentación en el secador solar diseñado y construido consta de varios elementos que serán descritos a continuación.

Inicialmente para medir temperatura se consideró utilizar un sensor de temperatura LM35 y un sensor de humedad DHT11, conectados a la placa Arduino uno y a la pantalla I2C-LCD la conexión se muestra en la Figura 11. Posteriormente, la placa Arduino 1 fue sustituida por la placa Arduino nano, y el sensor DHT11, fue sustituido por el sensor DHT22, esto para ahorrar espacio y utilizar la mayor cantidad de pines en la plataforma Arduino nano, además para aprovechar la mayor precisión del sensor DHT22. En la Figura 12, se muestra dicha conexión

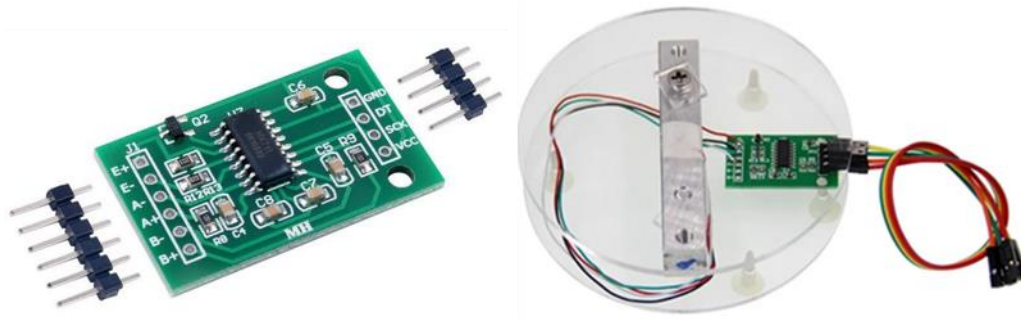


*Figura 11. Conexión a la placa Arduino de los sensores LM35 y DHT11. Elaboración propia.*

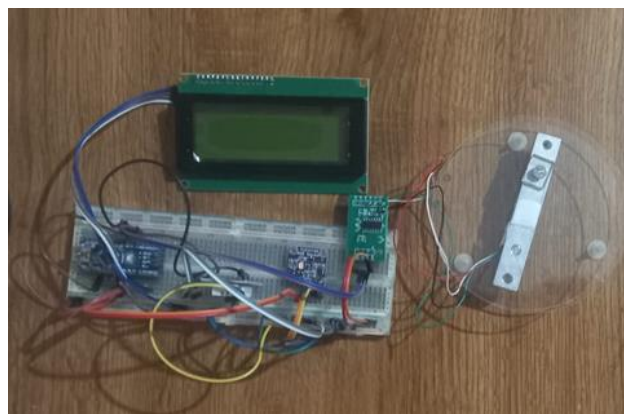


*Figura 12. Conexión a la placa Arduino nano de los sensores LM35 y DHT22 y pantalla LCD. Elaboración propia.*

Medir el peso del producto conforme avanza el proceso de secado es uno de los factores más importantes al momento de realizar el experimento. El sensor de peso fue hecho con el módulo HX711, y un sensor de carga para 5Kg, las imágenes se muestran en la Figura 13, mientras que en la Figura 14 se muestra la conexión completa.

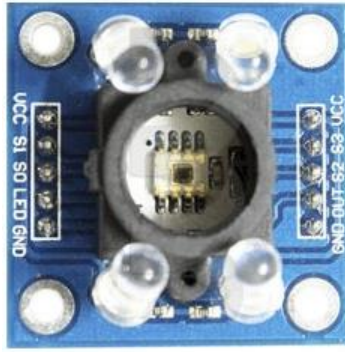


*Figura 13. Módulo HX711 y sensor de peso. Elaboración propia.*



*Figura 14. Conexión del sensor de peso. Elaboración propia.*

La medición de color o colorimetría es otro de los factores esenciales para el secado de alimentos, esta variable nos indica como va cambiando el color del producto conforme avanza el proceso. Para esto se utilizó el sensor de color TCS3200 conectado a la placa Arduino nano al igual que los otros sensores, en la Figura 15 se muestra dicho sensor.



*Figura 15. Sensor de color TCS3200. Elaboración propia.*

Los ventiladores implementados en el secador solar son ventiladores de 120 x 120 x 25 cm, con estructura de plástico cuadrada, con 7 aspas, perforaciones estándar para fijación a equipos, voltaje de operación de 12 volts de corriente directa (0.28 A), velocidad de 2200 revoluciones por minuto y flujo de aire de 83 pies cúbicos por minuto.

En la Figura 16 se observa el montaje, utilizando el Arduino dicho circuito será independiente de los sensores mostrados anteriormente, debido a que se ocuparon todos los pines.



*Figura 16. Conexión del ventilador al Arduino uno. Elaboración propia.*

PROTEUS PCB DESIGN, es una aplicación para elaborar proyectos utilizando equipos electrónicos, su uso tiene varias ventajas, ya que una vez que se diseña el esquema electrónico la programación del software y la construcción de la placa de circuito impreso son tareas relativamente sencillas. En la Figura 18, Figura 19 y Figura 36 se observan la PCB diseñada con dicho software, se muestra el diseño tanto electrónico como en tres dimensiones y la placa de circuito impreso.

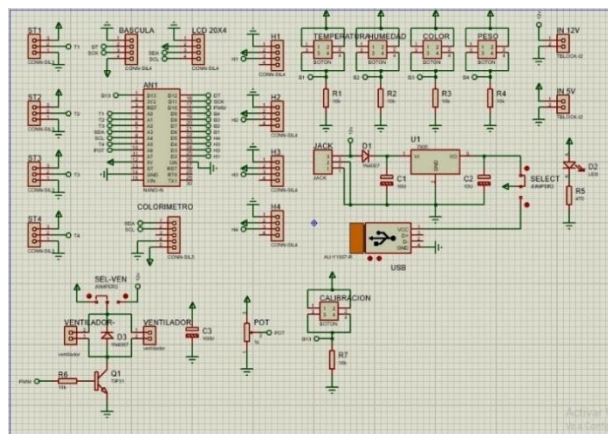


Figura 17. Diseño electrónico de la instrumentación del secador solar en Proteus. Elaboración propia.

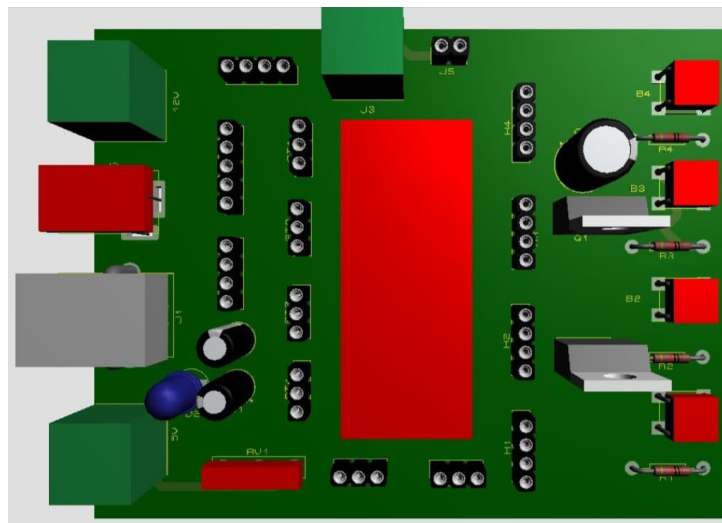


Figura 18. PCB en tres dimensiones. Elaboración propia.

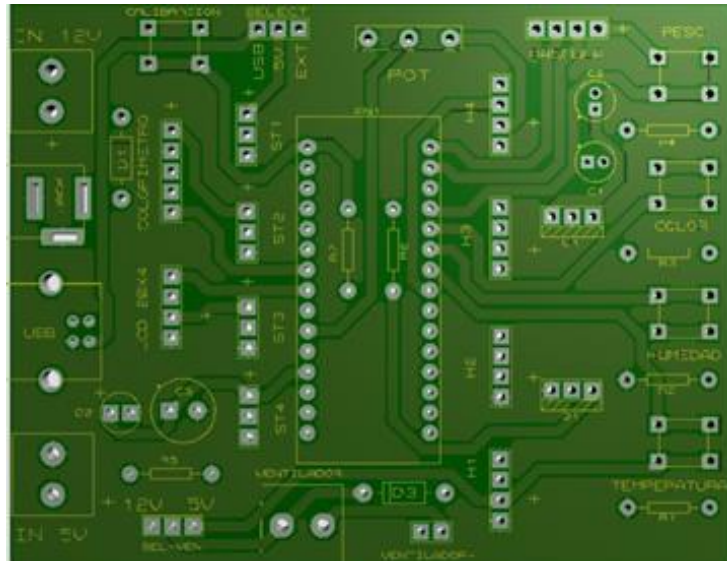


Figura 19. Placa de circuito impreso. Elaboración propia.

El prototipo electrónico construido se muestra en la Figura 20 en la cual se observa que se le soldaron los componentes electrónicos necesarios como resistencias, diodos, botones, capacitores, transistores y leds.

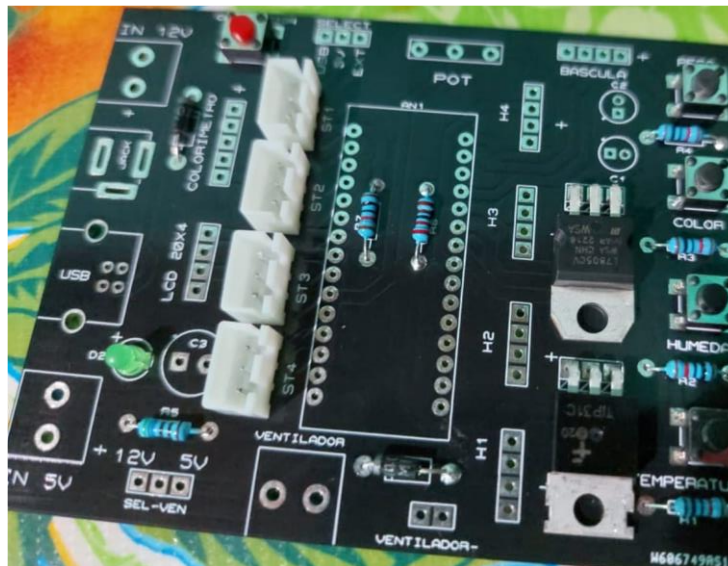


Figura 20. Montaje de componentes electrónicos en la placa de circuito impreso. Elaboración propia.

En la Figura 21 se muestra el diseño terminado, al cual son conectados los sensores, dichos sensores no fueron soldados a la placa, para de esta manera cambiarlos en caso de ser necesario.

*Figura 21. Diseño final de la placa de circuito impreso a la cual se conectan los sensores.  
Elaboración propia.*

### 6.3 CLIMATOLOGÍA

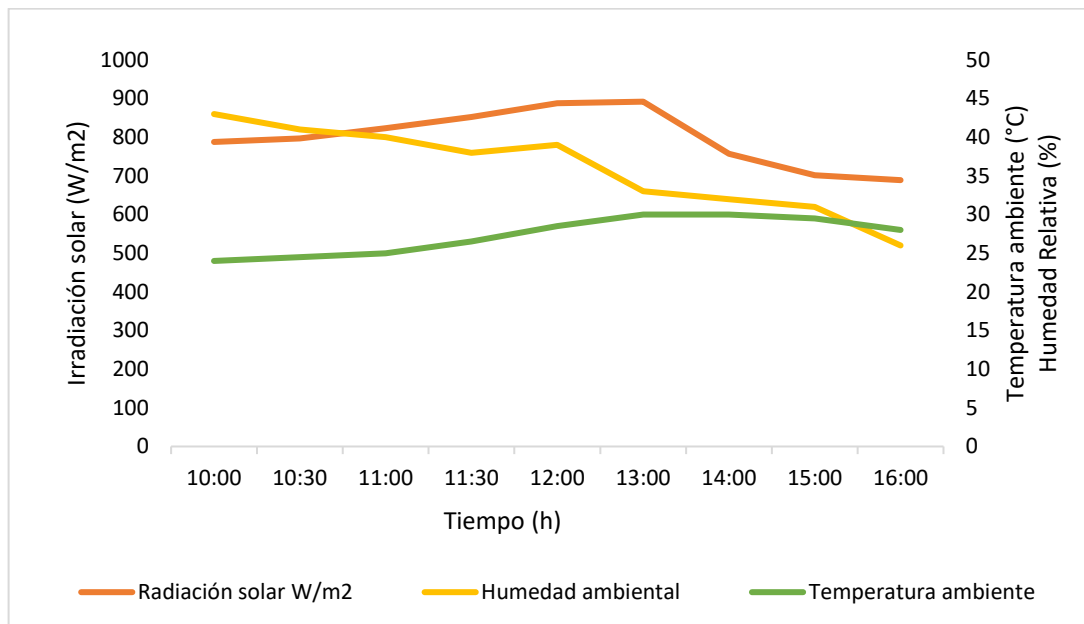
la velocidad del viento determinan la velocidad a la que se evapora el agua de los productos. Un secador solar bien diseñado puede alcanzar temperaturas internas entre 50°C y 70°C, lo que permite una deshidratación adecuada sin comprometer la calidad del alimento. Al monitorear estas variables, se puede ajustar el proceso para optimizar el tiempo de secado y asegurar que el producto final cumpla con los estándares de conservación y calidad.

Se presenta en la Figura 22 una gráfica en la que se puede ver el comportamiento climático de un día tomando como referencia durante la experimentación, con la intención de correlacionar estas condiciones climáticas con los tiempos de secado y las temperaturas alcanzadas en el secador construido. De igual forma, en la Tabla 16, se pueden analizar los datos que originan la gráfica mencionada.

***Tabla 16. Datos del comportamiento climático de un día de prueba tomado como ejemplo, durante la experimentación***

|        | Radiación solar  | Humedad       | Temperatura ambiente |
|--------|------------------|---------------|----------------------|
| Hora   | W/m <sup>2</sup> | Relativa<br>% | °C                   |
| 10: 00 | 788              | 43%           | 24°                  |
| 10:30  | 797              | 41%           | 24.5°                |
| 11:00  | 823              | 40%           | 25°                  |
| 11:30  | 852              | 38%           | 26.5°                |
| 12: 00 | 888              | 39%           | 28.5°                |
| 13:00  | 892              | 33%           | 30°                  |
| 14:00  | 757              | 32%           | 30°                  |

|              |     |     |       |
|--------------|-----|-----|-------|
| <b>15:00</b> | 702 | 31% | 29.5° |
| <b>16:00</b> | 689 | 26% | 28°   |



*Figura 22. Comportamiento climático de un día de prueba tomado como ejemplo, durante la experimentación. Elaboración propia.*

La gráfica anterior, muestra el comportamiento de las condiciones climáticas durante un día de secado solar de desechos de pescado, filetes de cazón y camarón, utilizando un secador solar. Se observan tres variables importantes: irradiación solar ( $\text{W/m}^2$ ), humedad ambiental relativa (%), y temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ), todas ellas registradas entre las 10:00 y las 16:00 horas:

- **Irradiancia solar:** Comienza en un valor alto, alrededor de  $800 \text{ W/m}^2$  a las 10:00, lo que indica que hay suficiente energía solar al inicio del experimento. A medida que avanza el día, la irradiación se mantiene relativamente constante, con una ligera disminución después de las 13:00, posiblemente debido a la posición del sol o la presencia de nubes. A pesar

de la reducción, sigue siendo alta durante todo el experimento, lo cual es favorable para el proceso de secado.

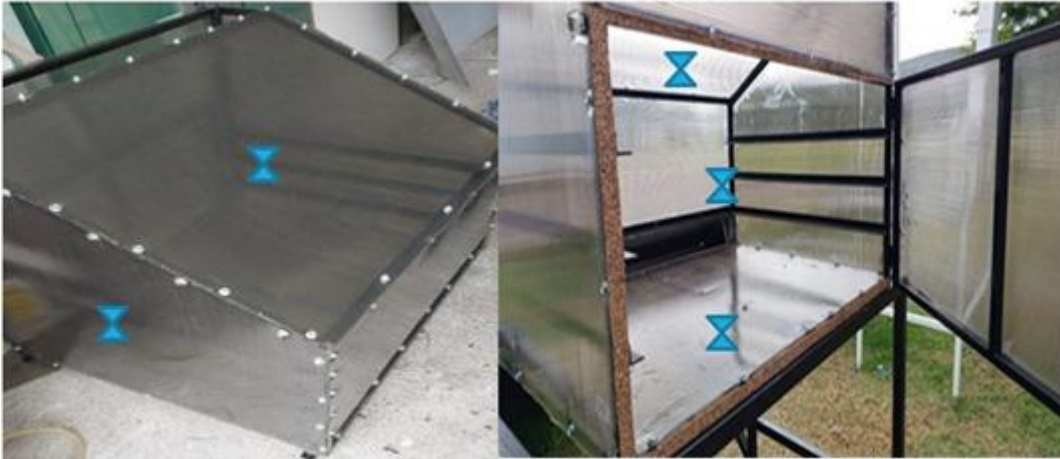
- **Humedad ambiental:** La humedad relativa empieza en torno al 40% y muestra una ligera tendencia a la baja conforme avanza el día, llegando a valores cercanos al 30%. Esta disminución es beneficiosa para el secado, ya que una menor humedad en el ambiente favorece la evaporación del agua de los materiales.
- **Temperatura ambiente:** Aumenta de forma constante desde aproximadamente 28 °C hasta cerca de 32 °C hacia las 14:00, momento en el que se estabiliza. Una temperatura ambiental más alta acelera el proceso de secado, ya que incrementa la capacidad del aire para absorber humedad.

En conjunto, las condiciones climáticas durante este día de experimentación fueron favorables para el secado solar, con una buena irradiación solar constante, una disminución de la humedad ambiental, y un aumento progresivo de la temperatura. Estas condiciones permiten un proceso de secado más eficiente, especialmente en las horas centrales del día cuando la irradiación y la temperatura son más altas.

#### **6.4 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SECADOR SOLAR MIXTO**

Se consideraron 5 diferentes puntos de la cámara de secado, seleccionados de forma estratégica para obtener un perfil de temperaturas en la cámara de secado que fuera representativo y confiable para evaluar el comportamiento térmico del secador solar mixto construido. En la Figura 23 se puede apreciar la distribución

de los puntos tomados como referencias (cara superior externa, pared lateral externa, base interna, flotando en la parte media interna de la cámara de secado y zona de extracción de aire interna).



*Figura 23. Distribución de perfiles para toma de temperaturas en la cámara de secado. Elaboración propia.*

Se presentan en la Figura 24 las temperaturas registradas en diferentes puntos de la cámara de secado: cara superior externa, pared lateral externa, base interna, aire flotante en la parte media interna y zona de extracción de aire interna, a lo largo del tiempo desde las 10:30 hasta las 18:30. Se observa que todas las mediciones siguen un patrón de incremento constante a lo largo del día, alcanzando temperaturas cercanas a los 60°C a las 18:30. Aunque las diferencias entre las mediciones son mínimas, es notable que la base interna y la zona de extracción de aire interna alcanzan las temperaturas más altas, lo cual es esperable dado que estas zonas están más expuestas a la concentración de calor dentro de la cámara. La cara superior externa y la pared lateral externa también muestran un aumento constante, aunque ligeramente inferior al de las mediciones internas, lo que sugiere que la estructura del secador solar ayuda a retener el calor

de manera eficiente. El monitoreo en diferentes puntos permite identificar posibles variaciones en la distribución del calor dentro del secador, lo cual es crucial para garantizar un secado homogéneo de los productos.

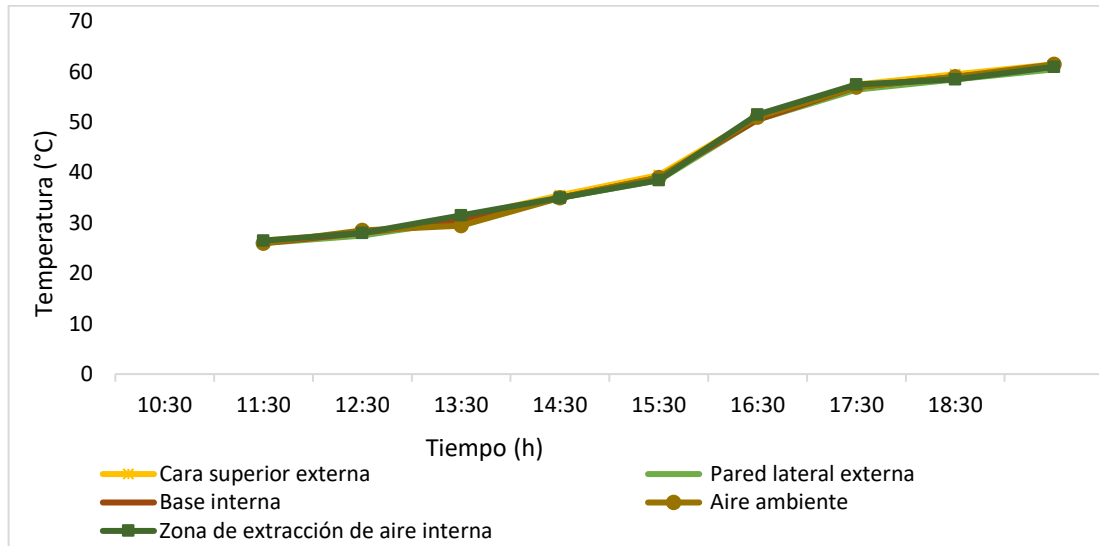


Figura 24. Temperaturas registradas en diferentes puntos de la cámara de secado. Elaboración propia.

La Figura 25 representa las fotografías en las que se observa la ubicación de los sensores en diferentes posiciones estratégicas dentro de la cámara de secado. Estos sensores se colocan en la cara superior externa, la pared lateral externa, la base interna, en la parte media interna (donde el aire circula) y en la zona de extracción de aire. Cada ubicación fue seleccionada para capturar datos clave sobre la distribución del calor dentro del secador. Los estudiantes, equipados con herramientas especializadas, se aseguran de que los sensores estén firmemente sujetos para obtener lecturas precisas y consistentes a lo largo del tiempo. Este proceso es esencial para entender cómo se comporta el flujo de calor en diferentes áreas del secador durante el ciclo de secado.

Monitorear y correlacionar las condiciones climáticas con las temperaturas que alcanza el secador solar es crucial para optimizar el proceso de secado. Al registrar variables como la irradiación solar, la temperatura ambiente y la humedad relativa, en conjunto con las temperaturas internas del secador, es posible ajustar el diseño y operación del sistema para mejorar su eficiencia. El control de estas variables asegura que el producto en proceso de secado mantenga su calidad, al evitar sobrecalentamientos o zonas con temperaturas insuficientes. Este tipo de instrumentación proporciona una base de datos sólida para futuros estudios y mejoras en los secadores solares, garantizando que el proceso sea eficiente en diversas condiciones climáticas.



*Figura 25. Colocación del sistema de adquisición de datos en el secador solar mixto.*

## **6.5 SECADO DE FÍLETE DE CAZÓN EN SECADOR SOLAR MIXTO**

A continuación, se presentan los resultados del secado solar de filete de cazón, camarón y desechos de ambos productos. Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el desempeño térmico de un secador solar y su eficacia para deshidratar productos marinos. La importancia de este proceso radica en que, para determinar si un secador solar funciona de manera óptima, es crucial relacionar el tiempo de secado y la pérdida de peso del producto con las

temperaturas alcanzadas en función de las condiciones climáticas. El secado de productos como el cazón y el camarón requiere un control preciso de la temperatura, ya que influye directamente en la velocidad de evaporación del agua y, por ende, en la calidad final del producto.

Al medir la pérdida de peso a lo largo del tiempo y compararla con las variaciones de temperatura dentro del secador, es posible obtener una idea clara de la eficiencia del sistema en diferentes condiciones ambientales. Además, este análisis permite identificar si las temperaturas alcanzadas son suficientes para lograr un secado rápido y uniforme sin comprometer las propiedades organolépticas y de conservación de los alimentos. En resumen, secar productos como el filete de cazón y el camarón bajo condiciones controladas no solo proporciona información sobre la viabilidad técnica del secador solar, sino que también ofrece una base para mejorar su diseño y operación, garantizando así un proceso de secado eficiente y de alta calidad.

En la Tabla 17 se presentan los datos iniciales de las muestras que fueron monitoreadas durante el proceso de secado solar en el secador solar mixto, el cual fue diseñado y construido específicamente para este estudio. Las muestras consisten en filete de cazón, camarón y desechos tanto de filete como de camarón, seleccionadas con el fin de evaluar el comportamiento del secado en diferentes tipos de productos marinos y subproductos. Cada muestra fue cuidadosamente dispuesta sobre mallas de material plástico, optimizadas para permitir una adecuada circulación de aire y asegurar un secado uniforme.

Durante el proceso, se realizó un monitoreo continuo de la pérdida de peso de las muestras, registrando mediciones en intervalos regulares, hasta alcanzar la humedad crítica, un punto clave donde se reduce significativamente la tasa de pérdida de agua. Este parámetro fue utilizado para determinar la estabilidad del proceso de secado, asegurando que las condiciones ambientales y operativas permitieran obtener un producto final con las características deseadas de conservación y calidad. Se consideró un día soleado durante el periodo de experimentación, como ejemplo para su análisis en el presente documento.

**Tabla 17. Datos iniciales del peso de las muestras más el peso de las mallas**

|                                                            | <b>Peso</b>   | <b>inicial</b> | <b>Peso</b>       | <b>inicial</b> |
|------------------------------------------------------------|---------------|----------------|-------------------|----------------|
| <b>Mallas</b>                                              | <b>mallas</b> |                | <b>producto</b>   | <b>+</b>       |
|                                                            | <b>(g)</b>    |                | <b>mallas (g)</b> |                |
| <b>Malla 1 (filete cazón)</b>                              | 2.0           |                | 52.02             |                |
| <b>Malla 2 (filete cazón)</b>                              | 3.0           |                | 51.25             |                |
| <b>Malla 3 (filete cazón)</b>                              | 3.0           |                | 51.16             |                |
| <b>Malla 4 (camarón)</b>                                   | 2.0           |                | 52.06             |                |
| <b>Malla 5 (camarón)</b>                                   | 2.0           |                | 52.04             |                |
| <b>Malla 6 (desperdicios<br/>de camarón y<br/>pescado)</b> | 3.0           |                | 21.02             |                |

Así mismo, se muestra en la Tabla 18 la temperatura de la cámara de secado al inicio del experimento (Columna No. 2), el peso inicial de las muestras frescas (columna # 3) y el porcentaje de humedad de las muestras frescas (columna # 4). Se puede observar que el porcentaje de humedad es muy similar en las muestras tomadas como referencia en el presente estudio, en promedio 73% de humedad, es muy importante cuidar este parámetro para obtener un secado homogéneo al final del proceso.

**Tabla 18. Temperatura, peso y humedad al inicio del experimento**

| <b>Muestras</b>                             | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Peso<br/>(g)</b> | <b>Humedad<br/>(%)</b> |
|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| Malla 1 (filete cazón)                      | 36                          | 50.02               | 75                     |
| Malla 2 (filete cazón)                      | 36                          | 48.25               | 72                     |
| Malla 3 (filete cazón)                      | 36                          | 48.16               | 74                     |
| Malla 4 (camarón)                           | 36                          | 50.06               | 74                     |
| Malla 5 (camarón)                           | 36                          | 50.04               | 73                     |
| Malla 6 (desperdicios de camarón y pescado) | 36                          | 18.02               | 70                     |

En la tabla 19, se muestran los datos obtenidos a lo largo de seis horas y media (tiempo del experimento) para la muestra 1 de filete de cazón, con los datos respectivos de pérdida de peso y velocidad del secado.

**Tabla 19. Datos de secado de la muestra 1 de un filete de cazón**

---

| Horario | Tiempo(h) | Peso(g) | $\Delta X/\Delta t$ |
|---------|-----------|---------|---------------------|
| 11:00   | 0         | 50.02   | 0.02                |
| 11:15   | 0.25      | 49.22   | 0.02                |
| 11:30   | 0.5       | 48.25   | 0.03                |
| 11:45   | 0.75      | 47.04   | 0.02                |
| 12:00   | 1         | 46.14   | 0.02                |
| 12:15   | 1.25      | 45.23   | 0.03                |
| 12:30   | 1.5       | 44.12   | 0.02                |
| 12:45   | 1.75      | 43.19   | 0.03                |
| 13:00   | 2         | 42.04   | 0.08                |
| 13:30   | 2.5       | 37.18   | 0.08                |
| 14:00   | 3         | 33.32   | 0.16                |
| 14:30   | 3.5       | 27.32   | 0.21                |
| 15:00   | 4         | 22.14   | 0.12                |
| 15:30   | 4.5       | 20.08   | 0.13                |
| 16:00   | 5         | 18.19   | 0.18                |
| 16:30   | 5.5       | 16.04   | 0.11                |
| 17:00   | 6         | 15.02   | 0.00                |
| 17:30   | 6.5       | 15.02   | 0.00                |

---

La gráfica de la Figura 26 representa la variación del peso de un filete de cazón que inició con un peso de 50.02 g, este peso fue disminuyendo a lo largo del tiempo. Cuando las mediciones fueron realizadas en un rango de 0 a 15 minutos la variación del peso fue mínima con un promedio de 1 g cada 15 minutos. A partir de las 13:00 h, la variación del peso de la muestra fue más rápida, con una pérdida de entre 3 g y 5 g, el peso del filete de cazón alcanzó estabilidad (humedad de equilibrio) a las 17:00 h, quedando con un peso de 15.02 g, lo cual indica que la pérdida total de masa fue de 35 g, en un tiempo de 6 h con 30 minutos. El error en la gráfica se considera de acuerdo con datos reportados por el fabricante en la báscula utilizada ( $\pm 0.05\%$ ).

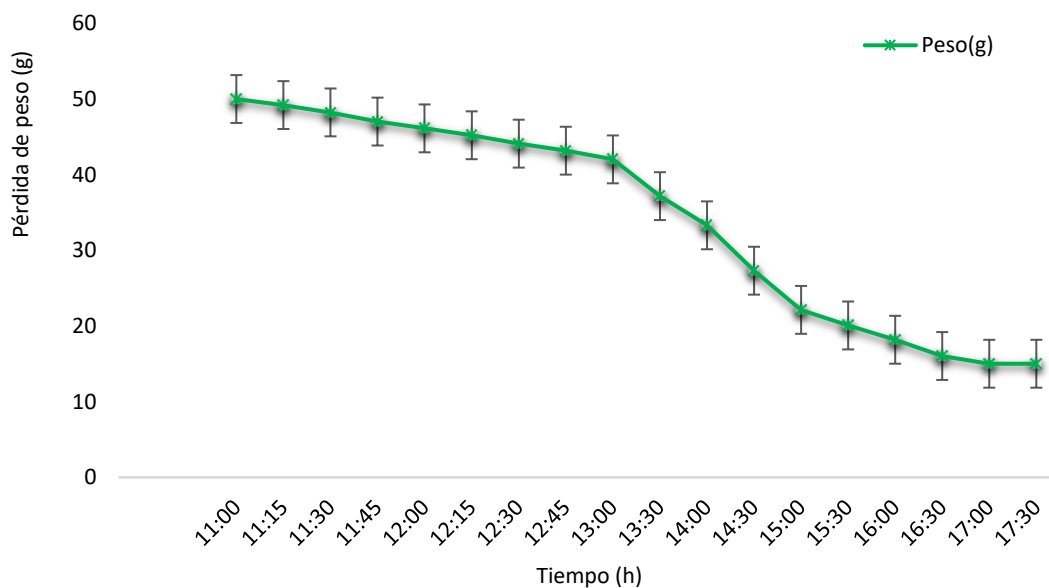


Figura 26. Variación de peso en función del tiempo en la muestra de filete de cazón.

En la Figura 27, se observa el contenido de humedad en función del tiempo: la cinética de secado inicia las 11:00 am y se estabiliza el proceso de secado a las 17:30 h.

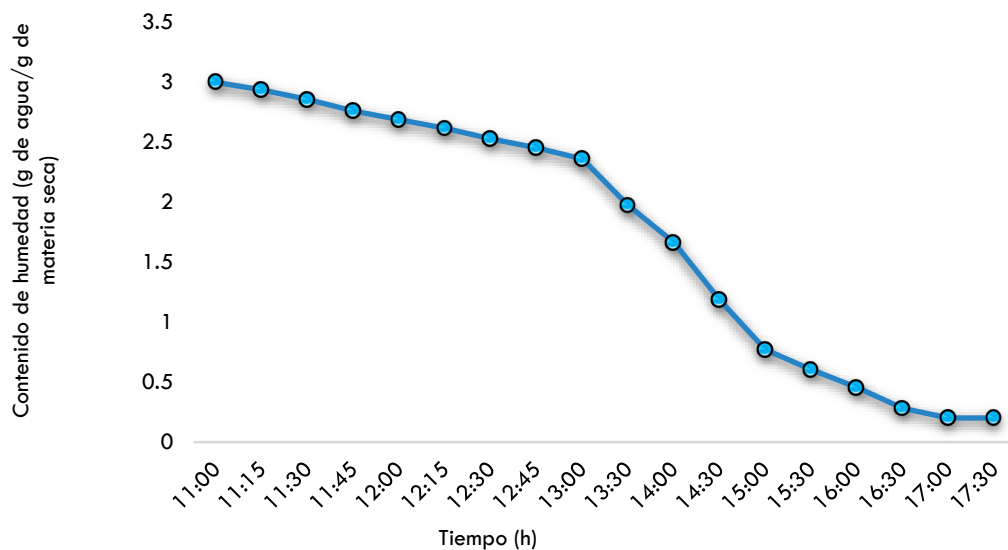


Figura 27. Contenido de humedad vs Tiempo en la muestra de filete de cazón. Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 28, se aprecia un decremento de la humedad libre a la vez que se incrementa el tiempo del producto en el secador. En esta gráfica se observa una variación gradual de la inclinación de la curva de secado, dato que muestra una velocidad aproximadamente constante durante el secado. El porcentaje de humedad libre comienza en 58% y se estabiliza en 5.29%.

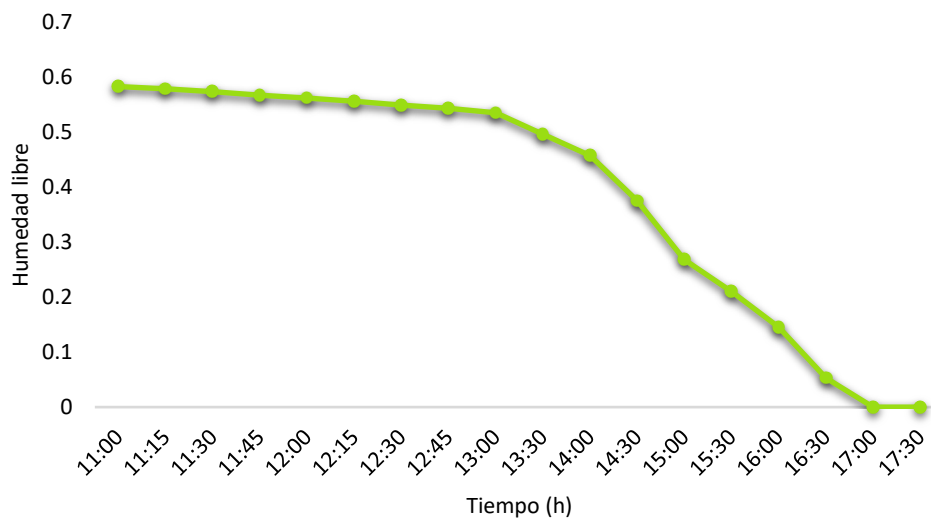


Figura 28. Curva de secado Humedad libre vs Tiempo. Elaboración propia.

En la gráfica de la Figura 29, se muestra la velocidad de secado en función del tiempo. En esta gráfica se observa una variación gradual de la inclinación de la curva de secado, dato que muestra una velocidad aproximadamente constante durante el secado. El porcentaje de humedad libre comienza en 58% y se estabiliza en 5.29%.

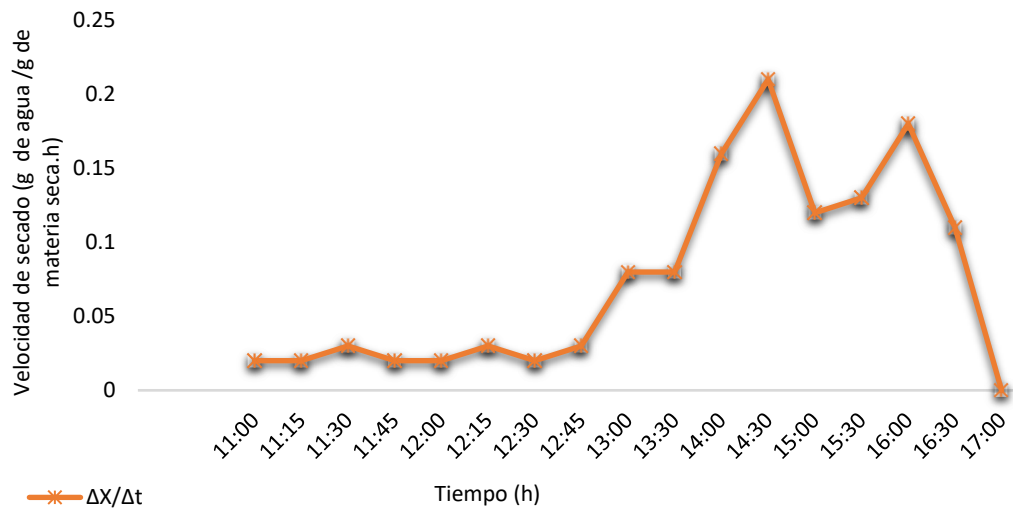


Figura 29. Curva de Velocidad de secado vs Tiempo. Elaboración propia.

En la Figura 30, se observa la gráfica de la curva de velocidad de secado en función del tiempo de secado, esta curva es útil puesto que determina el lapso de secado ya sea cuando la velocidad es constante o cuando esta decrece, también permite observar el tiempo en el cual se realiza la transición. En los primeros minutos del proceso la velocidad de secado sigue un patrón creciente pero discontinuo, a partir de las dos horas de secado logra periodos constantes y crecientes, posteriormente a las tres horas y media del proceso se observa que se alcanza la máxima velocidad para continuar con periodos decrecientes que terminan a las cuatro horas, a partir de este tiempo nuevamente la velocidad de secado crece y alcanza su punto máximo a las cinco horas para posteriormente

alcanzar periodos decrecientes que se detienen aproximadamente a las seis horas del proceso.

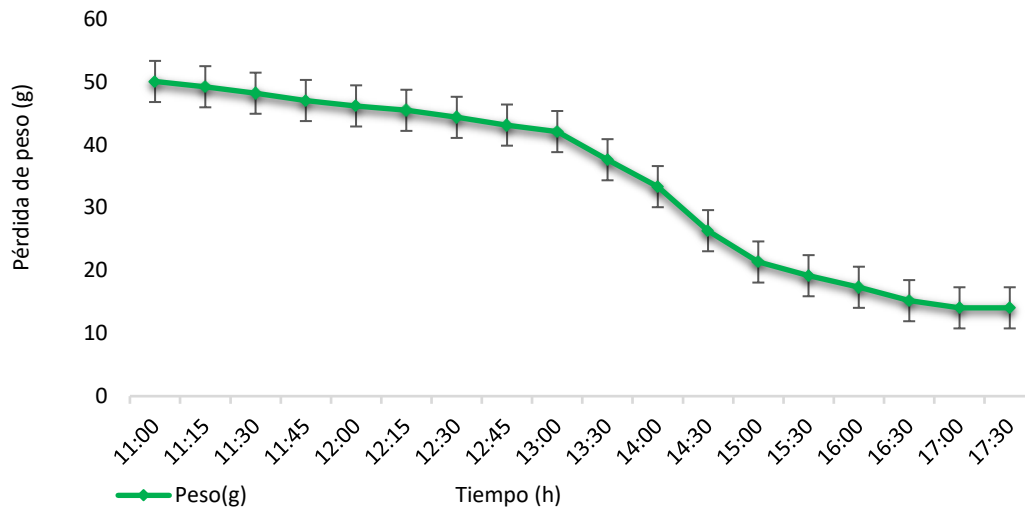


Figura 30. Variación de peso en función del tiempo en la muestra de camarón. Elaboración propia.

## 6.6 SECADO SOLAR DE CAMARÓN EN UN SECADOR SOLAR MIXTO

La deshidratación de camarón en un secador solar protegido es un proceso clave para mejorar la calidad y prolongar la vida útil del producto de manera sostenible. Al utilizar energía solar, se reduce la dependencia de combustibles fósiles, lo que disminuye costos operativos y la huella de carbono. El secador solar protegido protege el camarón de contaminantes externos, como polvo e insectos, y permite un control más uniforme de las condiciones de secado, lo que ayuda a conservar mejor las propiedades nutricionales y organolépticas del producto, asegurando una mayor seguridad alimentaria y calidad comercial.

En la Tabla 20 se presentan los principales datos del proceso de secado de camarón en el secador solar mixto construido para el desarrollo de la presente tesis.

**Tabla 20. Datos de secado de Camarones en el secador solar mixto**

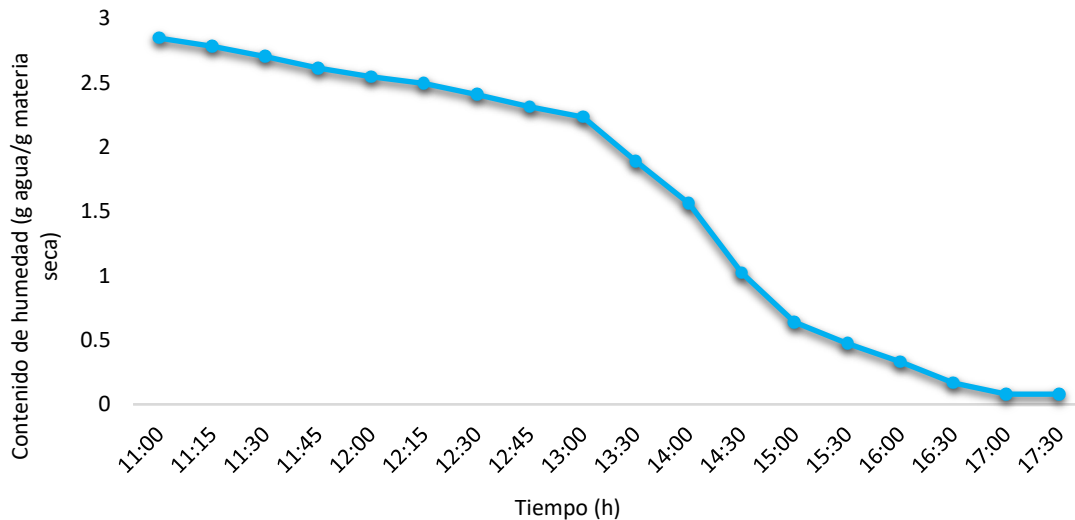
| <b>Tiempo</b> | <b>Peso</b> | <b><math>\Delta X/\Delta t</math></b> |
|---------------|-------------|---------------------------------------|
| <b>(h)</b>    | <b>(g)</b>  |                                       |
| <b>11:00</b>  | 50.06       | 0.01774888                            |
| <b>11:15</b>  | 49.22       | 0.02260804                            |
| <b>11:30</b>  | 48.19       | 0.02664712                            |
| <b>11:45</b>  | 47.03       | 0.02061996                            |
| <b>12:00</b>  | 46.17       | 0.01735951                            |
| <b>12:15</b>  | 45.47       | 0.02891503                            |
| <b>12:30</b>  | 44.35       | 0.03348551                            |
| <b>12:45</b>  | 43.12       | 0.02954634                            |
| <b>13:00</b>  | 42.09       | 0.07366988                            |
| <b>13:30</b>  | 37.61       | 0.08887903                            |
| <b>14:00</b>  | 33.33       | 0.20801325                            |
| <b>14:30</b>  | 26.32       | 0.23080395                            |
| <b>15:00</b>  | 21.34       | 0.13879083                            |
| <b>15:30</b>  | 19.16       | 0.14433399                            |
| <b>16:00</b>  | 17.32       | 0.21075027                            |
| <b>16:30</b>  | 15.19       | 0.13904806                            |
| <b>17:00</b>  | 14.05       | 0                                     |

|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>17:30</b> | 14.05 | 0 |
|--------------|-------|---|

La gráfica de la figura 42 representa la variación de la masa de 50.06 gramos de camarones dicha masa fue variando a lo largo del tiempo. Cuando las mediciones fueron realizadas en un rango de 0 a 15 minutos la variación del peso fue mínima con un promedio de un gramo cada 15 minutos, esto debido a que el secador le tomó tiempo en alcanzar una temperatura ideal. A partir de las 13:00 horas la variación de la masa del producto aceleró con una pérdida de entre tres y siete gramos, la masa del filete de cazón alcanzó estabilidad a las 17:30 horas quedando con un peso de 14.05 gramos, lo cual indica que la pérdida total de masa fue de 36.01 gramos, en un tiempo de seis horas con treinta minutos.

La Figura 31 muestra el comportamiento del contenido de humedad en el camarón a lo largo del tiempo durante un proceso de secado solar. Se observa que el contenido de humedad, medido en gramos de agua por gramo de base seca, disminuye de manera constante a lo largo del tiempo. Durante las primeras horas, el descenso en la humedad es más gradual, comenzando desde aproximadamente 3 g de agua/g de base seca a las 11:00 h y disminuyendo hasta alrededor de 2 g hacia las 14:00 h. Esto indica que, en esta etapa inicial, la evaporación del agua libre en la superficie del camarón ocurre a un ritmo más

lento debido a la naturaleza del proceso de secado solar, que depende de las condiciones ambientales y la radiación solar disponible.



*Figura 31. Contenido de humedad vs Tiempo de secado en la muestra de camarón. Elaboración propia.*

A partir de las 14:00 h, el descenso en el contenido de humedad se acelera considerablemente, lo que sugiere que el proceso de secado alcanza una fase crítica donde la evaporación del agua interna se vuelve más eficiente. Esta aceleración se mantiene hasta las 16:00 h, cuando la curva se estabiliza alrededor de los 0.5 g de agua/g de base seca. La estabilización indica que la mayor parte del agua ha sido eliminada, alcanzando valores mínimos cercanos a cero a las 17:30 h, lo que sugiere que el camarón está casi completamente deshidratado. Este patrón es característico de procesos de secado por fases, donde la etapa final requiere más tiempo para eliminar el agua restante, que está más fuertemente ligada a la matriz interna del producto.

La gráfica de humedad libre en la muestra de camarón durante el secado muestra una tendencia decreciente conforme avanza el tiempo. Al inicio del proceso, a las

11:00 h, el contenido de humedad libre es cercano a 0.7. Durante las primeras horas, entre las 11:00 h y las 14:00 h, la disminución en la humedad libre es relativamente lenta y estable, lo que indica que el agua superficial y fácilmente evaporada aún está siendo removida de manera paulatina. Este comportamiento es típico en las primeras fases del secado, donde el agua no está tan fuertemente ligada al material y se evapora de manera continua.

A partir de las 14:00 h, la gráfica muestra una caída más pronunciada en el contenido de humedad libre, lo que coincide con una etapa de secado más eficiente, donde la evaporación del agua interna, que está menos disponible en la superficie, se acelera. Este descenso se intensifica hasta las 16:00 h, donde la curva comienza a estabilizarse cerca del valor de 0.1. En las últimas horas, entre las 16:30 h y 17:30 h, el contenido de humedad libre se aproxima a cero, lo que indica que casi toda el agua libre ha sido eliminada, quedando solo trazas mínimas de humedad residual. Este patrón es común en el secado de productos, donde la eliminación del agua libre es más rápida al inicio y se vuelve más lenta a medida que el contenido de agua disminuye. Ver Figura 32.

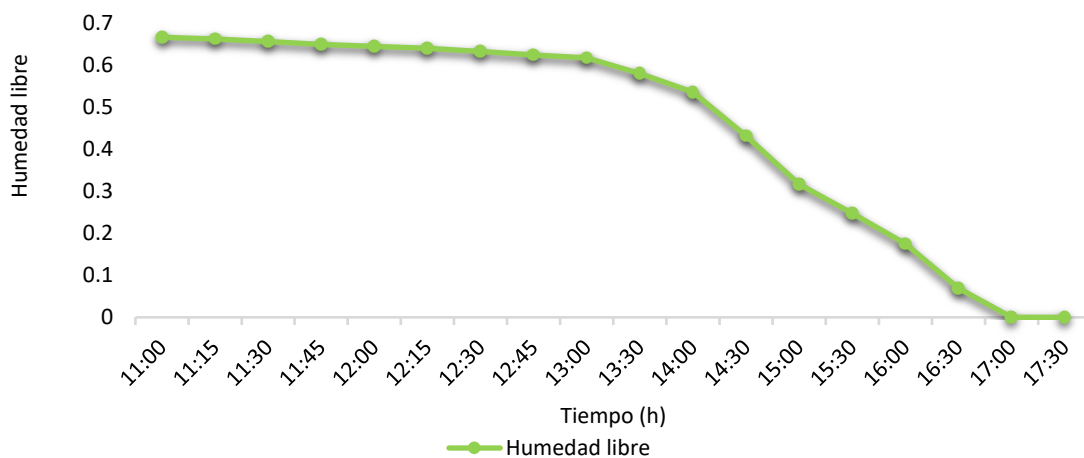


Figura 32. Humedad libre vs Tiempo de secado en la muestra de camarón. Elaboración propia.

La Figura 33, presenta la gráfica de velocidad de secado en función del tiempo para la muestra de camarón, dicha gráfica muestra varias fases clave en el proceso de secado. Durante las primeras horas, de 11:00 a 13:30 h, la velocidad de secado es baja y constante, alrededor de 0.02 g de agua/g de materia seca por hora, lo que indica un ritmo lento de eliminación de agua, típico de la etapa inicial del secado, donde el agua superficial es eliminada de forma gradual. Entre las 13:30 h y 14:00 h, la velocidad de secado comienza a aumentar significativamente, lo que sugiere una mayor eficiencia en la evaporación del agua, posiblemente debido a un aumento en la radiación solar o una mejor exposición del producto. Entre las 14:00 h y las 16:00 h, se observa un comportamiento de picos en la velocidad de secado, alcanzando valores máximos de aproximadamente 0.22 g de agua/g de materia seca por hora, lo que indica que el proceso de secado es más rápido en esta fase. Esto podría estar relacionado con la eliminación del agua interna más accesible del camarón. Posteriormente, a partir de las 16:30 h, la velocidad de secado disminuye abruptamente, indicando que la mayor parte del agua ha sido eliminada y que el secado llega a una etapa final en la que el agua restante está más ligada al interior del producto, lo que reduce la eficiencia del secado. Finalmente, hacia las 17:30 h, la velocidad se aproxima a cero, lo que sugiere que el proceso ha alcanzado su punto de equilibrio y que casi toda el agua libre ha sido removida.

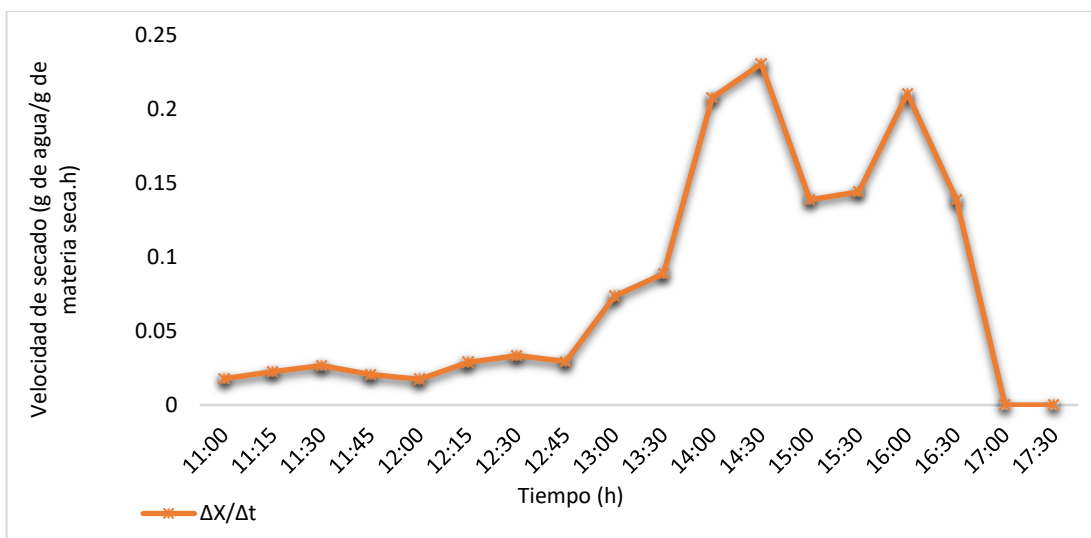


Figura 33. Velocidad de secado vs Tiempo de secado de la muestra de camarón. Elaboración propia

## 6.7 DESECHOS DE PESCADOS Y MARISCOS

Los desperdicios de pescados y mariscos han sido aprovechados de diferentes formas en los últimos años, ya que no sólo representan oportunidades económicas sino también sociales y ambientales. Entre los desechos más utilizados, están las aletas, espinas, cabezas, vísceras, agallas, músculos y piel, por lo que después de ser procesados forman una fuente relevante de proteínas, minerales y grasas que son aprovechados en la fabricación de una gran variedad de productos. Entre los productos elaborados a base de estos residuos se puede mencionar a las harinas, aceites, colágeno, gelatinas, aretes, gorras, carteras, cinturones, todo esto con una perspectiva sustentable (95).

En la tabla 21, se muestran los datos obtenidos a lo largo de seis horas y media que fue el tiempo del experimento para la muestra 6 que estuvo conformada por varios desechos de pescado y camarón con un peso inicial de 18.02 gramos, además se muestra la humedad en base seca, humedad en base húmeda,

humedad libre y velocidad del secado. Los desechos que se utilizaron fueron cáscara de camarón, piel de pescado y espinas.

*Tabla 21. Datos de secado de la muestra de desperdicios de pescado y camarón*

| <b>Horario</b> | <b>Tiempo(h)</b> | <b>Peso(g)</b> | <b><math>\Delta X/\Delta t</math></b> |
|----------------|------------------|----------------|---------------------------------------|
| <b>11:00</b>   | 0                | 18.02          | 0                                     |
| <b>11:15</b>   | 0.25             | 18.02          | 0                                     |
| <b>11:30</b>   | 0.5              | 18.02          | 0.06530135                            |
| <b>11:45</b>   | 0.75             | 17.09          | 0                                     |
| <b>12:00</b>   | 1                | 17.09          | 0                                     |
| <b>12:15</b>   | 1.25             | 17.09          | 0                                     |
| <b>12:30</b>   | 1.5              | 17.09          | 0                                     |
| <b>12:45</b>   | 1.75             | 17.09          | 0                                     |
| <b>13:00</b>   | 2                | 17.09          | 0.04225569                            |
| <b>13:30</b>   | 2.5              | 16.02          | 0                                     |
| <b>14:00</b>   | 3                | 16.02          | 0                                     |
| <b>14:30</b>   | 3.5              | 16.02          | 0.00042155                            |
| <b>15:00</b>   | 4                | 16.01          | 0                                     |
| <b>15:30</b>   | 4.5              | 16.01          | 0                                     |
| <b>16:00</b>   | 5                | 16.01          | 0                                     |
| <b>16:30</b>   | 5.5              | 16.01          | 0                                     |
| <b>17:00</b>   | 6                | 16.01          | 0                                     |
| <b>17:30</b>   | 6.5              | 16.01          | 0                                     |

Se observa en la Figura 34, la pérdida de peso durante el proceso de secado de desechos de pescado en función del tiempo. La línea verde muestra los datos de peso con barras de error, lo que indica una cierta variabilidad o incertidumbre en las mediciones. La línea azul representa una línea de tendencia polinómica, que suaviza las fluctuaciones y permite observar mejor la tendencia general en el tiempo. Al inicio del secado, el peso disminuye rápidamente. Esto es típico en los procesos de secado donde se elimina primero el exceso de agua superficial de los materiales.

A medida que avanza el tiempo, la tasa de pérdida de peso se reduce, lo que sugiere que se ha eliminado la mayor parte del agua libre y comienza la etapa en la que se seca el agua ligada a nivel molecular, lo cual es más lento.

A partir de las 13:00 aproximadamente, el peso se estabiliza alrededor de los 16 gramos, indicando que el proceso de secado ha alcanzado una fase casi estable con poca pérdida de agua adicional. Se pueden observar fluctuaciones en los puntos de medición alrededor de las 12:45 y las 13:00, lo que podría deberse a algún ajuste en el proceso de secado (cambio en la temperatura, ventilación, o manipulación del material). La línea de tendencia polinómica (en azul) muestra un ajuste que sigue de cerca los datos medidos. El ajuste polinómico es útil para suavizar las pequeñas variaciones y resaltar la tendencia decreciente general del proceso de secado.

El descenso más pronunciado ocurre durante las primeras dos horas (entre las 11:00 y las 13:00), lo que indica que es la etapa más efectiva para la eliminación

de agua. Después de esta etapa, el proceso de secado es más lento y estabilizado, sugiriendo que podría requerir un tiempo prolongado para eliminar el agua restante, si es que queda alguna humedad importante.

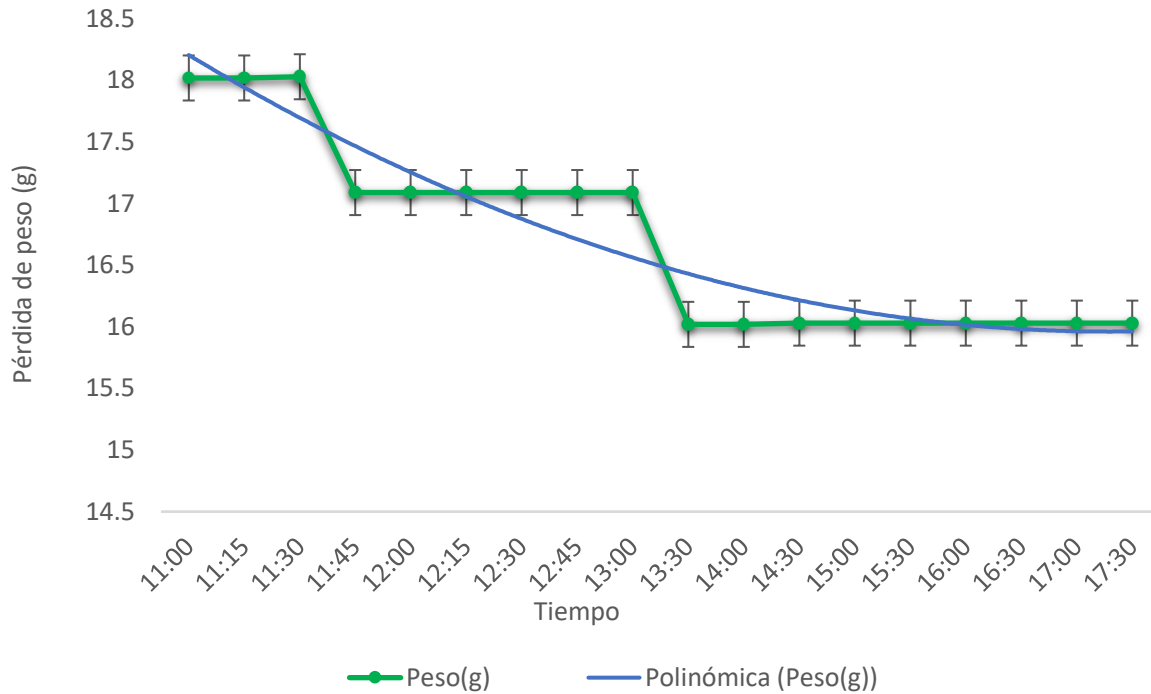
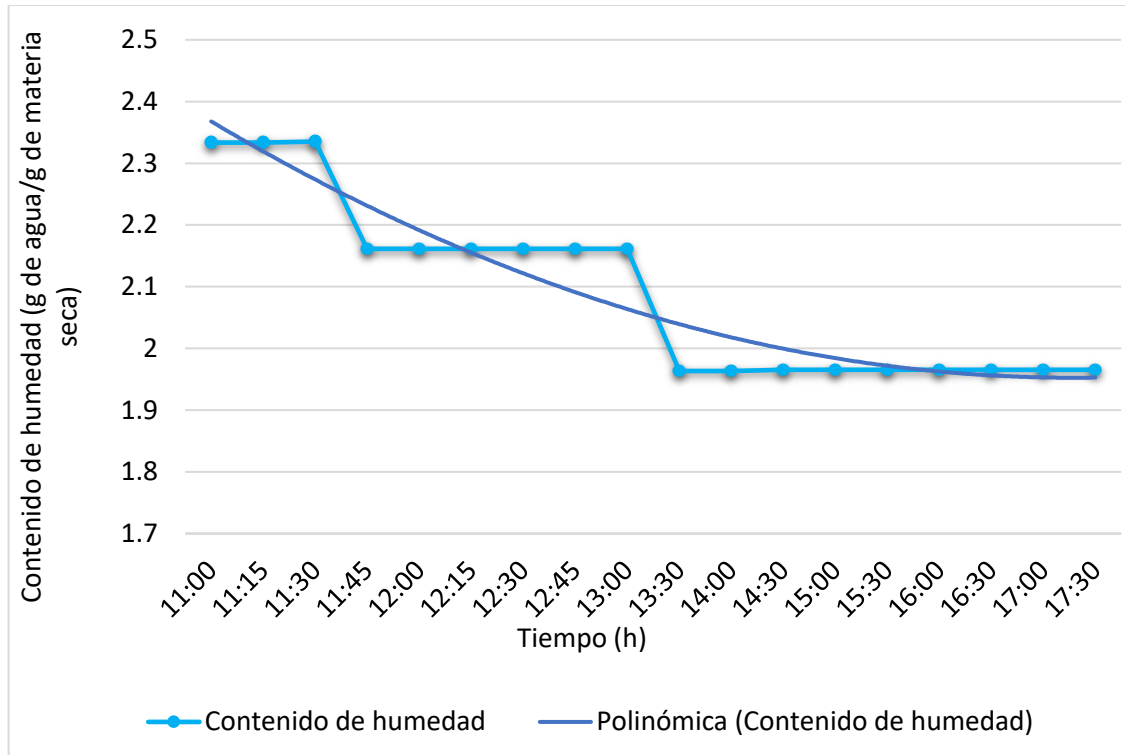


Figura 34. Pérdida de peso en función del tiempo del secado de residuos de pescado. Elaboración propia

En la Figura 35, se observa el comportamiento del contenido de humedad (en g de agua por g de materia seca) de los residuos de pescado a lo largo del tiempo durante el proceso de secado. Al inicio, el contenido de humedad es alto, alrededor de 2.4 g/g, lo que refleja una cantidad significativa de agua en el material. A medida que el secado avanza, el contenido de humedad disminuye progresivamente, con una tendencia clara de reducción más acelerada en las primeras horas, estabilizándose después de las 13:00, cuando el contenido de humedad se acerca a los 2 g/g. Esto indica que el secado es más eficiente en las primeras etapas, donde se elimina la mayor parte del agua libre, y se hace más

lento posteriormente cuando queda agua más fuertemente ligada. La línea de tendencia polinómica muestra una buena aproximación a la curva de datos, suavizando las pequeñas fluctuaciones observadas, especialmente antes de las 12:30, donde se nota cierta variabilidad.

El porcentaje de humedad inicial es del 70 %, y tiene un valor final de 66.27 %.



*Figura 35. Contenido de humedad vs Tiempo en las muestras de residuos de pescado. Elaboración propia*

En el capítulo de resultados, se analizó la caracterización térmica del secador solar mixto construido, enfocándose en las temperaturas alcanzadas durante el proceso de secado. Los resultados indicaron que las temperaturas internas del secador variaron en función de las condiciones climáticas externas, como la radiación solar y la temperatura ambiente, influyendo de manera directa en la eficiencia del secado.

Se observó una relación clara entre el clima y el proceso de secado de los diferentes materiales: desechos de pescado, filete de cazón y camarón. En días soleados, el secador alcanzó temperaturas más altas, lo que redujo los tiempos de secado, mientras que en días nublados o con menor radiación solar, el tiempo de secado se prolongó. Los desechos de pescado mostraron un tiempo de secado más largo en comparación con el filete de cazón y el camarón debido a su mayor contenido de humedad inicial.

## **6.8 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SECADOR**

### ***6.8.1 Comparación de Energía Generada y Energía Necesaria***

La energía necesaria para secar 15 kg de pescado es de **24,450.83 kJ**. Comparando con la energía generada:

- **Con radiación mínima:** La energía generada es **28,937.98 kJ**, suficiente para secar 15 kg de pescado en un solo día.
- **Con radiación máxima:** La energía generada es **37,297.83 kJ**, lo que garantiza que el secado se complete en menos de un día, con un excedente energético.

### ***6.8.2 Análisis de Eficiencia Energética***

La eficiencia del sistema se calcula como el porcentaje de energía utilizada para evaporar el agua con respecto a la energía total generada por el sistema combinado:

**Eficiencia con radiación mínima:**

$$(24,450.83/28,937.98) \times 100 \approx 84.5\%$$

**Eficiencia con radiación máxima:**

$$(24,450.83/37,297.83) \times 100 \approx 65.5\%$$

El análisis realizado muestra que el sistema de secado solar, compuesto por un colector de aire y un secador solar directo, presenta una eficiencia energética elevada bajo diferentes condiciones de radiación solar. Con radiación mínima (4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día), el sistema alcanza una eficiencia de 84.5%, lo que indica un uso óptimo de la energía generada para completar el secado del producto en un solo día. Por otro lado, en condiciones de radiación máxima (5.8 kWh/m<sup>2</sup>/día), la eficiencia se reduce a 65.5% debido a un excedente energético generado, lo que significa que el proceso de secado se completa con un margen adicional de energía disponible.

Estos resultados sugieren que el sistema es particularmente eficiente en escenarios de radiación baja o moderada, aprovechando casi toda la energía disponible. En situaciones de radiación más alta, la menor eficiencia no implica un problema en el rendimiento, sino que refleja la capacidad del secador para operar con energía sobrante, permitiendo incluso procesar mayores cantidades de producto o reducir el tiempo de secado. En ambos casos, la implementación de este sistema puede contribuir significativamente a la reducción de costos operativos y a la sostenibilidad de la producción en comunidades con condiciones climáticas variables.

## **7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman la eficacia del secador solar mixto para el secado de productos marinos como el filete de cazón, el camarón y los subproductos de estos. A diferencia de los secadores solares convencionales, el sistema mixto mostró un comportamiento térmico más estable y eficiente, gracias a la combinación de un colector solar de aire y un sistema de secado directo, lo que permitió un control más preciso de las variables de secado. La uniformidad de las temperaturas internas, con un promedio de 60°C en la cámara de secado, y la capacidad de alcanzar valores cercanos a las condiciones ideales de secado durante las horas de máxima irradiación, contribuyeron a una reducción significativa del contenido de humedad en los productos. Este comportamiento evidencia que la configuración del sistema es adecuada para un secado homogéneo, sin fluctuaciones térmicas que puedan afectar la calidad del producto final.

Un aspecto destacable de la presente investigación es el uso de tecnologías de automatización basadas en Arduino, que facilitaron el monitoreo continuo de las condiciones de secado y el control automático del sistema. Esta implementación, junto con el diseño optimizado del circuito, permitió mantener condiciones estables en la cámara de secado, lo que se reflejó en la eficiencia de eliminación de agua y la calidad sensorial de los productos deshidratados. Los resultados obtenidos muestran que, bajo condiciones óptimas de radiación solar, el secador fue capaz de reducir el peso de las muestras de cazón y camarón en más del 70% en un

tiempo relativamente corto de 6 horas y 30 minutos. Además, se observó un comportamiento similar en el secado de subproductos como vísceras y cabezas de pescado, lo cual resalta el potencial del secador para el aprovechamiento integral de los recursos marinos, promoviendo la sostenibilidad y el valor agregado de los residuos pesqueros.

Sin embargo, a pesar de la eficiencia demostrada en condiciones climáticas favorables, es importante considerar que la variabilidad de la radiación solar y las fluctuaciones en la humedad relativa podrían afectar la operación del secador en diferentes estaciones del año. Se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en el desarrollo de estrategias de almacenamiento de energía térmica y en el uso de materiales con mayor capacidad de retención de calor para mejorar la operación del secador bajo condiciones de radiación solar baja o en días nublados. Adicionalmente, el uso de un sistema híbrido que combine energía solar y otras fuentes renovables, como la biomasa, podría garantizar un rendimiento óptimo del secador durante todo el año, ampliando así su aplicabilidad en regiones con climas menos favorables.

## **8 CONCLUSIONES**

El secador solar mixto desarrollado y evaluado en esta investigación ha demostrado ser una herramienta eficiente y sostenible para la conservación de productos marinos y sus subproductos. Los resultados muestran que el sistema es capaz de reducir el contenido de humedad de los alimentos de manera significativa, manteniendo la calidad sensorial y nutricional de los productos tratados. El diseño del sistema, que integra un colector de aire y un secador solar

directo, permite un control efectivo de las temperaturas internas, asegurando un secado uniforme y rápido en condiciones climáticas óptimas.

El uso de tecnologías de automatización como la plataforma Arduino ha facilitado el control y monitoreo continuo de las variables de secado, mejorando la estabilidad del proceso y reduciendo la intervención manual. Además, el secador mixto demostró ser versátil en el tratamiento de diferentes tipos de productos marinos, incluyendo filetes de cazón, camarones y subproductos como cabezas y vísceras, lo que sugiere su potencial para aplicaciones más amplias en la industria alimentaria y pesquera.

En términos de eficiencia energética, el secador solar mixto presentó un aprovechamiento óptimo de la energía solar disponible, con un rendimiento superior al de secadores solares convencionales en condiciones de alta radiación solar. Sin embargo, su eficiencia se ve afectada en condiciones de radiación baja, por lo que se recomienda explorar opciones de diseño que permitan mejorar su desempeño en climas variables, como la implementación de sistemas híbridos o el uso de materiales de almacenamiento térmico. Con base en estos resultados, se concluye que el secador solar mixto representa una alternativa viable y económica para la deshidratación de productos alimenticios en regiones con alta disponibilidad de radiación solar, contribuyendo a la sostenibilidad de las comunidades pesqueras y al desarrollo de tecnologías limpias para la conservación de alimentos.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

1. Téllez MC, Téllez BC, Tzuc O de JM, Marzoug R. Secado solar y conservación de alimentos. Ecofronteras. 2021;24–7.
2. Barreras FL. Preelaboración y conservación de alimentos. LibrosEnRed; 2007.
3. Osses M, Silva B, Ibarra C. El sol al servicio de la humanidad: historia de la energía solar en Chile. 2019;
4. Núñez TMZ, Falconí PRP, Eguez GCH, Machado ERR, Guerra JMG. Desarrollo de la seguridad alimentaria y su relación con las cinco claves de la OMS para la inocuidad de los alimentos. Polo del Conocimiento. 2024;9(2):130–46.
5. ACNUDH. Relator Especial sobre el derecho a la alimentación | OHCHR [Internet]. [cited 2024 Oct 2]. Available from: <https://www.ohchr.org/es/special-procedures/sr-food>
6. Lou XF, Nair J. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. Bioresour Technol [Internet]. 2009;100(16):3792–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408010572>
7. 2020 | FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. [cited 2024 Oct 2]. Available from: <https://www.fao.org/news/archive/news-by-date/2020/es/>
8. FAO: Formulación y preparación /producción de alimentos [Internet]. [cited 2024 Oct 2]. Available from: <https://www.fao.org/fishery/affris/perfiles-de->

las-especies/nile-tilapia/formulacion-y-preparacion-produccion-de-alimentos/es/

9. Mirón IJ, Linares C, Díaz J. The influence of climate change on food production and food safety. *Environ Res.* 2023;216:114674.
10. Patricia S, Andrade C. agricultural products : Literature Review. 2016;7–19.
11. Sharma A, Chen CR, Vu Lan N. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009;13(6–7):1185–210.
12. Belessiotis V, Delyannis E. Solar drying. *Solar Energy.* 2011;85(8):1665–91.
13. C. Tecni C. Secado Solar. *Agrowaste.* 2013;02:1–6.
14. Hernández R J, Martínez V. O, Quinto D P, Cuevas D J, Acosta O. R, Aguilar JO. Secado De Chile Habanero Con Energia Solar. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha.* 2010;10:120–7.
15. García LE, Mejía MF, Mejía DJ, Valencia CA. Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. *AVANCES Investigación en Ingeniería.* 2012;9(2):9–19.
16. Bala BK, Mondol MRA. Experimental Investigation on Solar Drying of Fish Using Solar Tunnel Dryer. *Drying Technology* [Internet]. 2001 Feb 28;19(2):427–36. Available from: <https://doi.org/10.1081/DRT-100102915>
17. Chavan B, Yakupitiyage A, Kumar S. Drying performance, quality characteristics, and financial evaluation of Indian Mackerel (*Rastrilliger kangurta*) dried by a solar tunnel dryer. *Thammasat International Journal of Science and Technology.* 2011 Jan 1;16:11–25.

18. Basunia M, Al-Handali H, Al-Balushi M, Rahman M, Mahgoub O. Drying of Fish Sardines in Oman Using Solar Tunnel Dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2011 Jan 1;B1:108–14.
19. Das T, Tiwari G. Heat and Mass Transfer of Greenhouse Fish Drying Under Forced Convection Mode. *International Journal of Agricultural Research*. 2008 Jan 1;3:69–76.
20. Sankat CK, Mujaffar S. Sun and Solar Cabinet Drying of Salted Shark Fillets. 2004 Jan 1.
21. Bala BK, Janjai S. Solar drying of fish (Mumbai duck) using solar tunnel dryer. *International Energy Journal*. 2005 Jan 1;6:91–102.
22. Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2010;14(1):1–30. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001567>
23. Alimohammadi Z, Samimi Akhijahani H, Salami P. Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods. *Solar Energy* [Internet]. 2020;201:157–77. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20302061>
24. Oosthuizen D, Goosen NJ, Hess S. Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;253:119818. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619346888>

25. Deka D, Annapure US, Shirkole SS, Thorat BN. Techno-economics of solar assisted drying of small freshwater fish to ensure global nutritional security. *Drying Technology* [Internet]. 2023 Jun 1;41(7):1214–28. Available from: <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2134416>
26. Nasrat LS, Ghanem THM, Younis OS, Elmolakab KM, Tantawy AA. Design and Evaluation of a New Solar Dryer Equipped with Three Sides Flat Plate Collectors for Drying Tilapia Fish Fillets. *Aswan University Journal of Environmental Studies* [Internet]. 2024;5(3):243–61. Available from: [https://aujes.journals.ekb.eg/article\\_379937.html](https://aujes.journals.ekb.eg/article_379937.html)
27. Castillo-Téllez B, Castillo Téllez M, Campo MFM del, González EOZ, Domínguez Niño A, Mejía-Pérez GA. Solar-Dried Biofertilizers from Marine Waste: Enhancing the Circular Economy. *Sustainability* [Internet]. 2024;16(15). Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/15/6593>
28. Wang S, Jin J, Suo R, Wang Y, Wang J, Wang W, et al. Evaluation of Solar Drying on Drying Behaviour and Drying Kinetics of *Penaeus vannamei*. *Journal of Aquatic Food Product Technology* [Internet]. 2022 Apr 21;31(4):344–60. Available from: <https://doi.org/10.1080/10498850.2022.2048156>
29. Mehta P, Samaddar S, Patel P, Markam B, Maiti S. Design, and performance analysis of a mixed mode tent-type solar dryer for fish-drying in coastal areas. *Solar Energy* [Internet]. 2018;170:671–81. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18305371>

30. Obayopo SO, Oluwasanmi A. CFD and experimental analysis of direct solar dryer for fish. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2019;21(2):108–17.
31. Ronald S, Cu AT, Suárez-Rodríguez JA, Ciro S, Bergues-Ricardo C. Evaluación experimental de un secador solar tipo G abinete para el secado de hollejo de naranja. *Tecnología Química*. 2012;XXXII(2):186.
32. Entre C, Solar S, Tradicionales YM, Noa DEL. El deshidratado de los frutos de algarroba ( *prosopis alba* ). análisis comparativo entre secador solar y metodos tradicionales del noa. 2012;16:33–9.
33. Bistoni S, Iriarte A, Fagonde V. Secadero solar con estantes. 2015;16(1):22–33.
34. Garduño-García; Á, López-Cruz IL, Ruiz-García A. Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 2017;9(1):19–36.
35. Carmona López RJ, Richards H, Estrategías C. La Pobreza Como Eje De La Ética En Un Mundo Globalizado Poverty As the Crux of Ethics in a Globalized World. *Revista Ciencias Estratégicas Revista Ciencias Estratégicas | Medellín -Colombia Revista Ciencias Estratégicas*. 2011;19(25):101–1794.
36. Lobo, Blanca Rivero JAL. Seguridad alimentaria y desarrollo. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*. 2014;224:32.
37. Rural A, Alimentos YDDE. Almacenamiento Rural. 2019;

38. ONU. ONU. 2023. p. 1 La guerra en Ucrania impacta en la importación de alimentos de Medio Oriente y Norte de África. Available from: <https://news.un.org/es/story/2022/03/1505782>
39. Mendoza C, Jiménez G. Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 2017;58(1):2685–95.
40. Energías Renovables. Solar termoeléctrica: España, protagonista mundial. *Energías Renovables*. 2011;(102).
41. Merino L. Energías renovables para todos. *Iberdrola*. 2012;20.
42. Marín E. Redalyc. Energía eólica en España. 2004;
43. Santoyo É, Barragán-Reyes RM. Energía Geotérmica. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*. 2010;6(2):40–51.
44. Mareomotriz E, Nueva UNA. Energía mareomotriz; una nueva forma de generar energía limpia.
45. Soria E. Energía hidráulica.
46. Martínez Pillet V. El sol, nuestra estrella. *Revista Digital Universitaria*. 2009;10:17.
47. Navntoft C, Cristóbal MP. Introducción a la energía solar térmica. <https://www.Argentina.Gob.Arwww.Argentina.Gob.Ar>. 2019. 1–64 p.
48. Rica C, Heredia EN, Rica C, Rica C, Global DY, Heredia EN, et al. CÁLCULO ESPECTRAL DE LA IRRADIACIÓN SOLAR DIREC-. 2008;

49. Hernández-Gómez V, Olvera-García O, Guzmán-Tinajero P, Morillón-Gálvez D. Secado de frutas y verduras con energía solar. Artículo Revista de Sistemas Experimentales Junio. 2017;4(11):22–33.
50. Torres-Gallo R, Miranda-Lugo PJ, Martínez-Padilla KA. Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. TecnoLógicas. 2017;20(39):69–81.
51. Soledad Tapia M. CONTRIBUCIÓN AL CONCEPTO DE ACTIVIDAD DEL AGUA ( $a_w$ ) Y SU APLICACIÓN EN LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS EN LATINOAMÉRICA Y VENEZUELA CONTRIBUTION TO THE CONCEPT OF WATER ACTIVITY ( $a_w$ ) AND ITS APPLICATION IN FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY IN LATIN AME. 2020;LXXX(2):18–40.
52. An LGR. Determining the Enthalpy of Vaporization of Water. Scientia et Technica. 2011;(49):163–6.
53. Departamento de Biblioteconomía y Documentación, Trabajo fin de Máster DE, Ávila-Alonso R. Universidad Carlos iii De Madrid.
54. Fauroux LE, Diaz DO, Blanco GE, Degaetani OJ. “ Modelado , y análisis económico de colectores solares planos ” " Modeling , and economic analysis of flat solar collectors ". Universidad Nacional de la Matanza, Argentina. 2016;1.

55. Cerón JF. Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno. 2012;170.
56. Iglesias Díaz R, José Gómez RA, Lastres Danguillecourt O, López de Paz P, Farrera Vázquez N, Ibáñez Duharte GR. Diseño, construcción y evaluación de un secador solar para mango Ataulfo. Rev Mex De Cienc Agric. 2017;8(8):1719–32.
57. Agua V De. Capítulo 13.
58. Agua V De. Capítulo 13.
59. Diego Chaverri, Roberto J. Moya. Temperatura y humedad relativas en un secador solar de plantas para la salud. Uniciencia. 2018;2(5):5–9.
60. Gemma I, Calvo D, Yanoy MS, Mesa M, Chaumel I, Ruiz CT. Influencia del color y forma del colector solar en el secado de semillas de soya Influence of the color and shape of solar collector in drying soybeans. 2016;24:62–7.
61. Gabriela S, Mecalco D, Ruth D, Pantoja Z, Natividad BI, Irma E, et al. ALIMENTOS MARINOS: TIPIFICACIÓN Y PROCESO DE ALMACENAMIENTO. 2005;
62. Gómez J, De Berrazueta J. Consumo De Pescado, Omega- 3 Y Factores De Riesgo Cardiovascular. Revista Med. 2007;15(2):218–24.
63. FOOD WASTE INDEX REPORT 2021. 2021.
64. Beneficios del consumo de pescado 1.
65. Casado A, Rodriguez B, Perez M, Lara P, Alonso I. Global Hunger Index. El Hambre y los sistemas alimentarios en situaciones de conflicto. 2021;1–60.

66. FAO. Escala de experiencia de inseguridad alimentaria [Internet]. Available from: <https://www.fao.org/in-action/voices-of-the-hungry/fies/es/>

## 10 ANEXOS

### 10.1 ANEXO I

#### Bocetos y Planos del Prototipo

Los Planos del prototipo se dibujaron en AUTOCAD, sin embargo, se realizaron bocetos al inicio del proyecto. En la Figura 36 y Figura 37 se muestran los bocetos del secador y de la cámara de secado, respectivamente, las cuales se fueron modificando conforme el avance y las dimensiones requeridas.

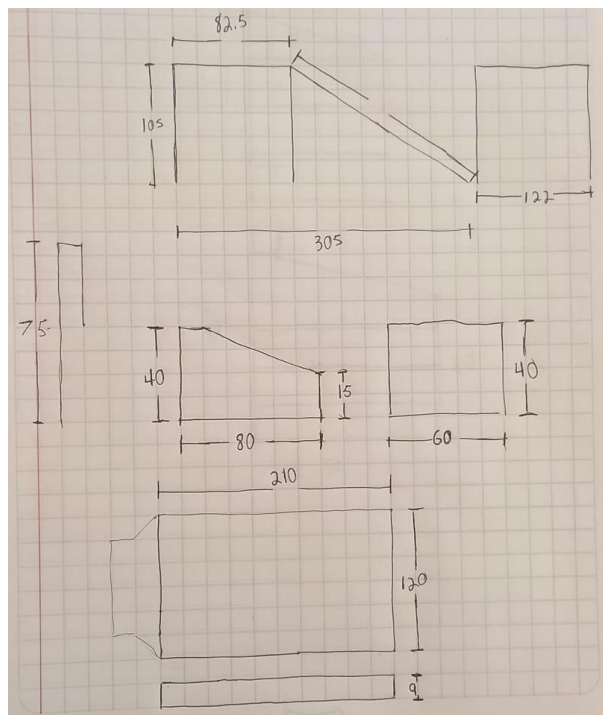
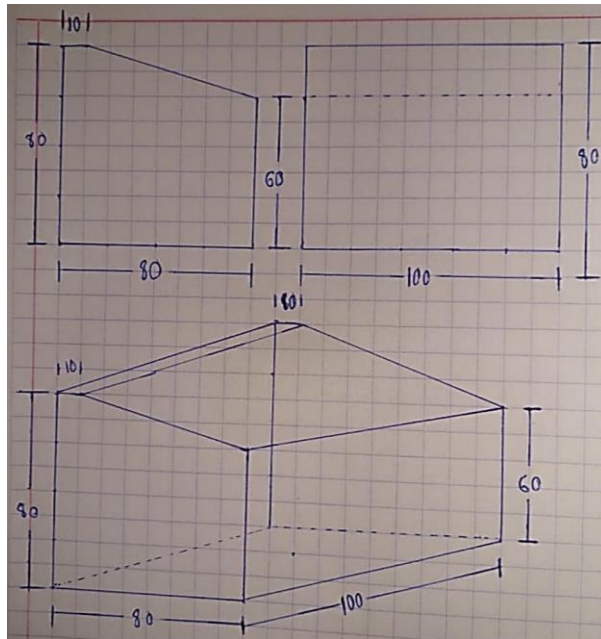
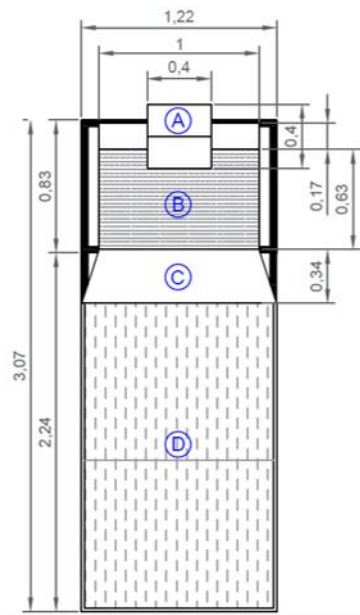


Figura 36. Bosquejo inicial del secador solar. Elaboración propia.

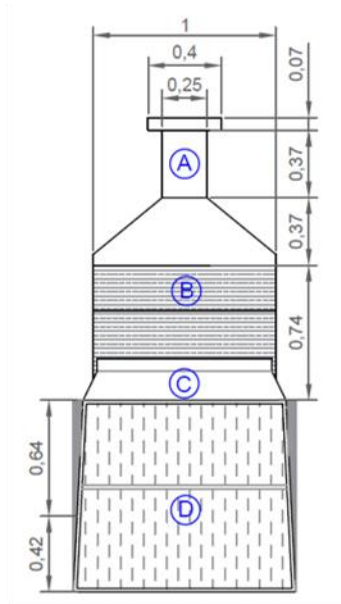


*Figura 37. Bosquejo inicial de la cámara de secado. Elaboración propia*

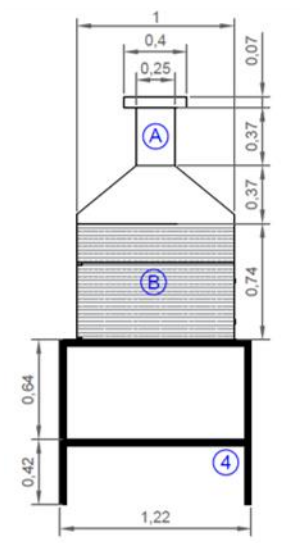
Posteriormente se inició con el diseño, se comenzó utilizando el software SolidWorks, pero dado que este software es mucho más apropiado para otro tipo de diseños, como por ejemplo piezas mecánicas, se optó por utilizar AutoCAD 2023, dado que es un software más robusto y con características tan importantes como la edición de geometría en 2D y modelos en 3D con sólidos y superficies, la vistas de la planta, trasera, lateral y frontal y la simbología del diseño, todo ello con sus respectivas dimensiones se muestran en la Figura 38 y Figura 39.



a) Vista Aérea



b) Vista frontal



c) Vista Trasera

#### Simbología

- A. Chimenea
- B. Cámara de secado
- C. Dren alveolos
- D. Colector
- 1. Estructura metálica (soporte colector)
- 2. Ángulo de anclaje (soporte colector)
- 3. Estructura metálica (escuadra)
- 4. Estructura metálica (base, cámara de secado)

Figura 38. Dimensiones y materiales del prototipo.

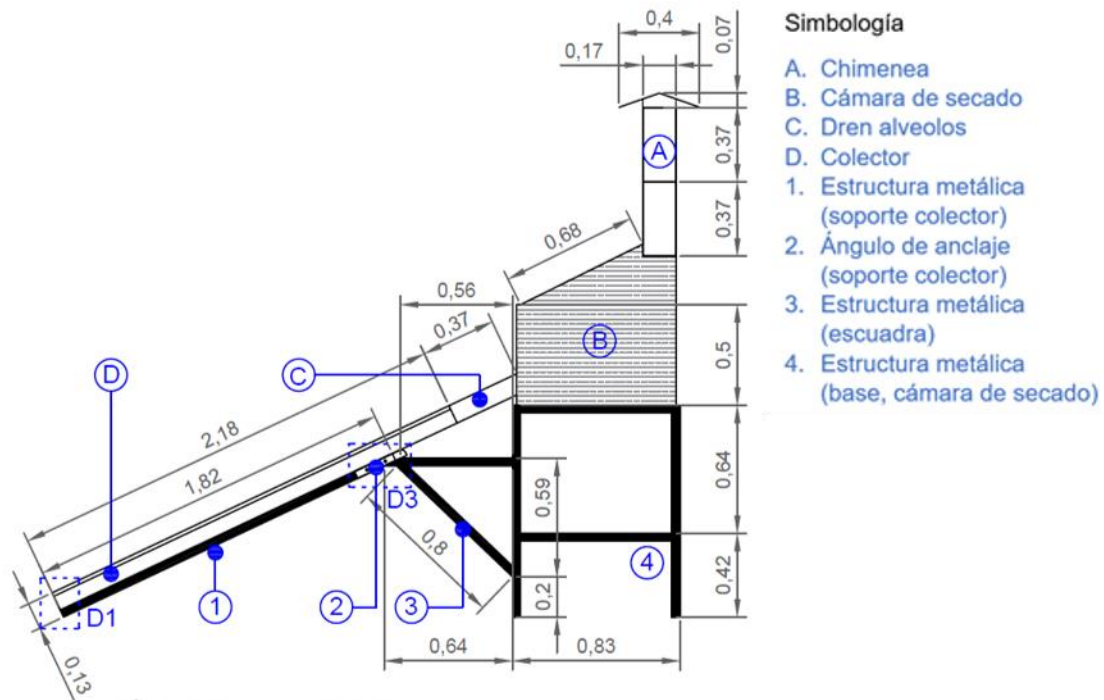
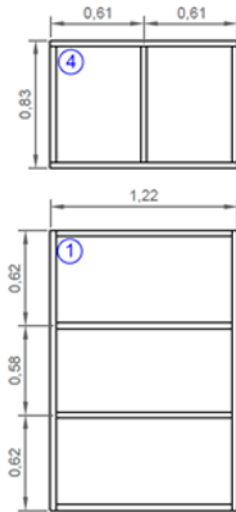
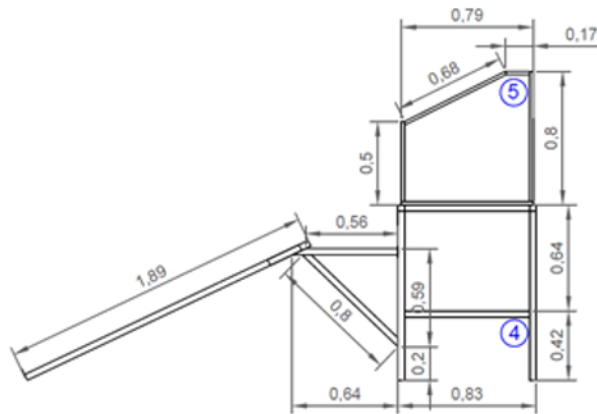


Figura 39. Vista lateral del prototipo. Elaboración propia.

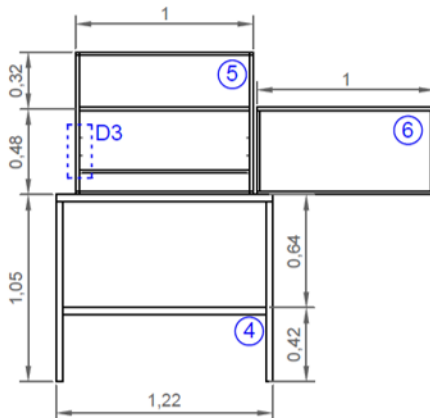
El material de la estructura externa fue planteado a partir de lo encontrado en diseños previos (99), donde prevalece el uso del metal, por lo que para este secador se eligió dicho material (Ver Figura 40).



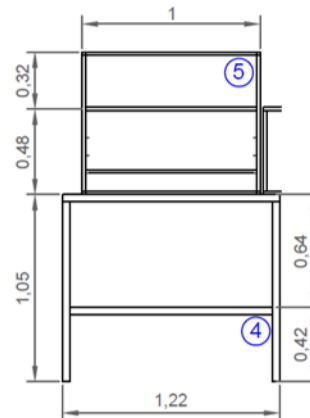
a) Vista Aérea



b) Vista lateral



c) Vista Trasera



d) Vista frontal

#### Simbología

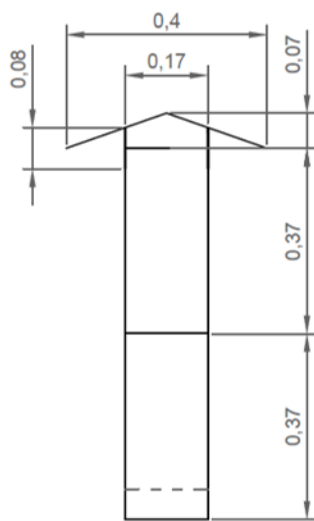
- |                                              |                                                    |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1. Estructura metálica<br>(soporte colector) | 4. Estructura metálica<br>(base, cámara de secado) |
| 5. Estructura metálica<br>(cámara de secado) | 6. Estructura metálica<br>(puerta de la cámara)    |

Figura 40. Estructura metálica del diseño en la cual se muestra la vista de la planta, la vista trasera, la vista lateral y la vista frontal, con sus respectivas dimensiones y simbología utilizada. Elaboración propia

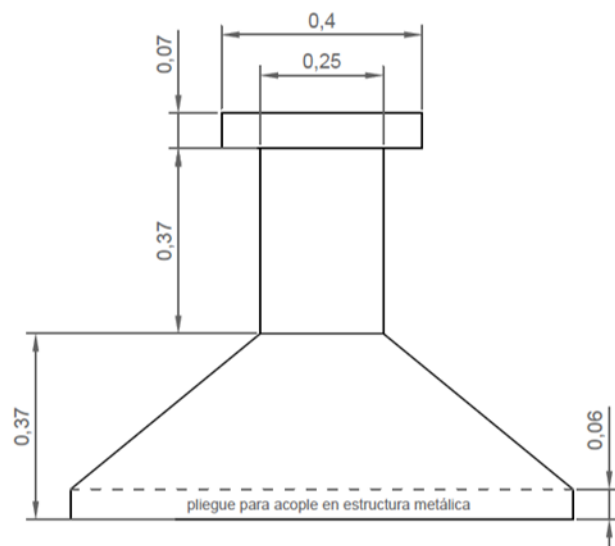
La estructura de la base metálica que soporta el colector y la cámara de secado está constituida por perfil metálico PTR de 1.5 pulgadas. La estructura metálica

que conforma la cámara de secado está conformada con perfil metálico PTR de  $\frac{3}{4}$  de pulgadas.

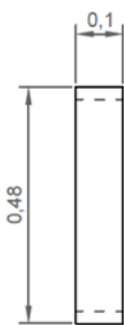
En la Figura 41, se observa el diseño de la chimenea más el dren de alvéolos, con sus respectivas vistas y dimensiones, para el diseño de estos elementos se tomó en cuenta diseños encontrados en la literatura (100), así como también se tomó como referencia el secador que se encuentra en el Centro Universitario del Norte.



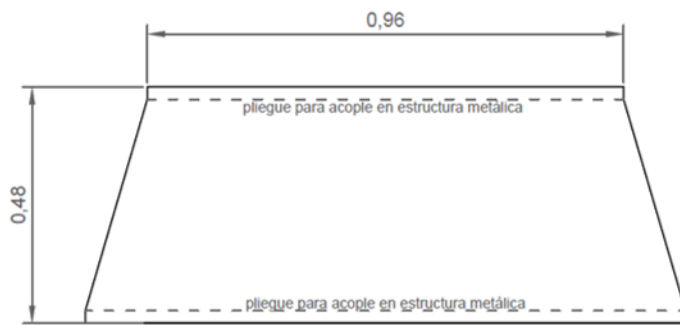
b) Vista lateral chimenea



d) Vista frontal trasera chimenea



c) Vista lateral dren alveolos



a) Vista frontal trasera dren alveolos

Figura 41. Vistas de la planta, lateral, trasera y frontal de la chimenea y del dren de alveolos. Elaboración propia

El calibre de la lámina para el forjado de la chimenea y dren de los alvéolos es del #16; cortado conforme a patrón de diseño y se realizaron ajustes pertinentes de acuerdo con requerimientos de la geometría del diseño integral del secador solar. El marco de aluminio (Al) habilitado para conformar la estructura del colector solar es con un perfil angular de aluminio calibre 18. La cubierta de policarbonato está cortada de acuerdo con la geometría, y tiene un espesor de 6mm en color gris, esto se puede observar en la Figura 42.

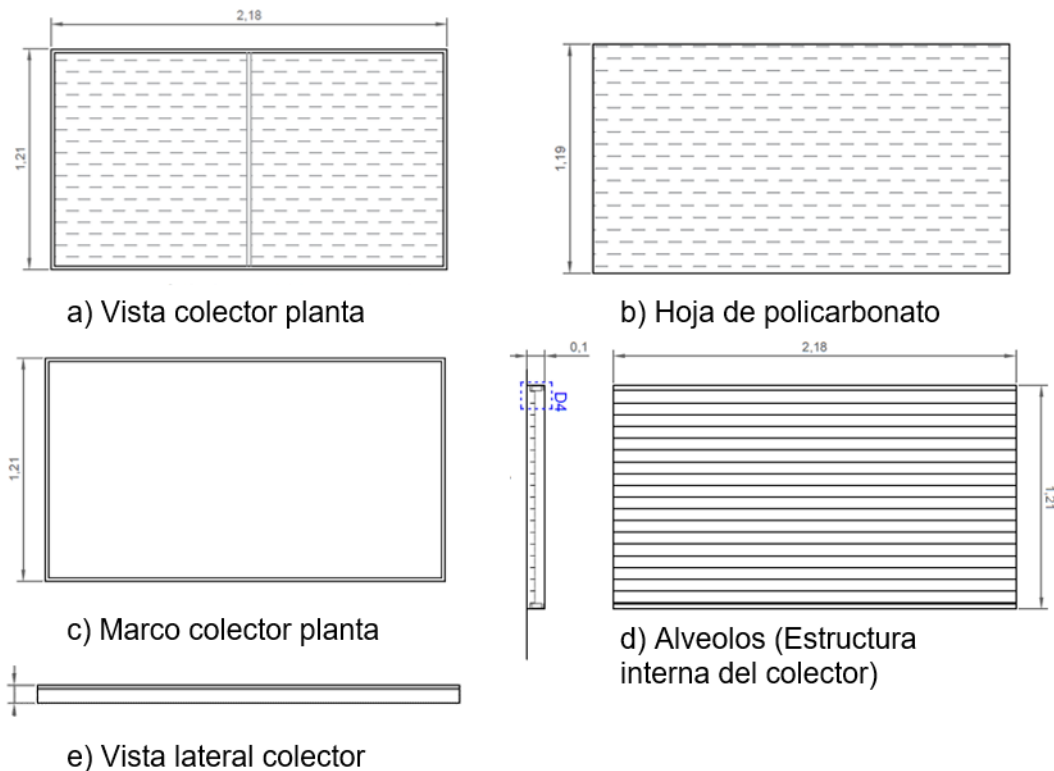
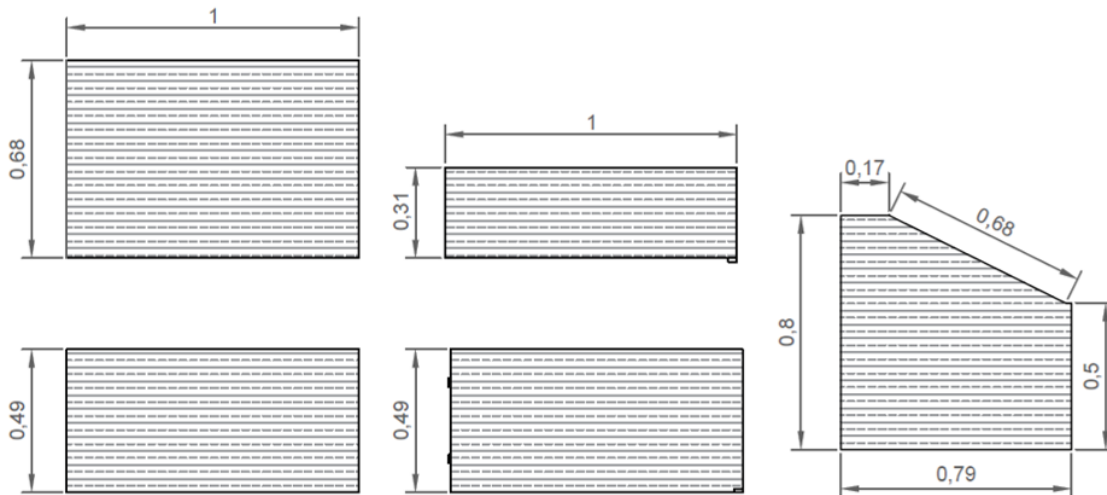


Figura 42. Vistas lateral y colector planta, hoja de policarbonato, marco colector planta y alveolos. Elaboración propia

En esta subetapa también se centró en elegir los materiales adecuados para garantizar la durabilidad y eficiencia del secador:

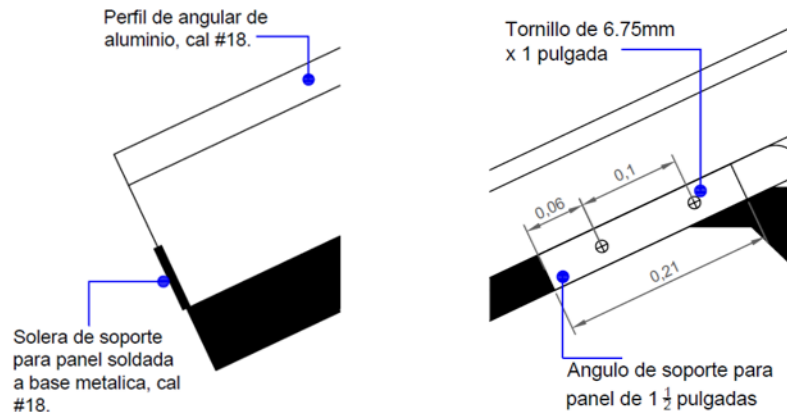
**Materiales Estructurales:** Se optó por utilizar acero solera de acero para la estructura del secador debido a su alta resistencia a la corrosión y estabilidad en

Para construir la cámara de secado se decidió utilizar policarbonato debido a los beneficios que este material conlleva, por encima de algunos otros materiales como el acrílico. En la Figura 43 se muestra el material del que fue hecho el secador y sus dimensiones.



Se puede observar que en la Figura 44 se muestran detalles de la construcción de la solera de soporte, para la cual se utilizó perfil angular de aluminio calibre

número 18 y soldada a base metálica. Para el ángulo de anclaje del colector a base metálica se utilizaron tornillos de 6.75 mm por una pulgada y un ángulo de soporte para panel de  $1\frac{1}{2}$  pulgadas.



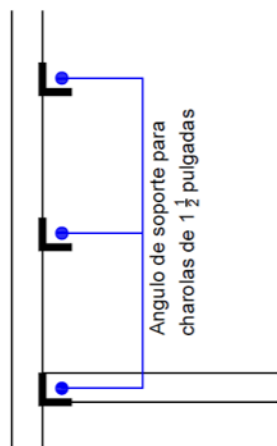
a) Solera de soporte para el colector

b) Ángulo de anclaje del colector a base metálica

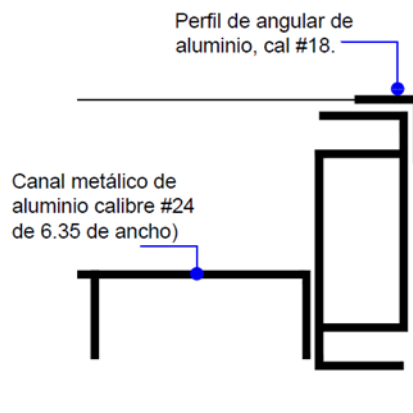
*Figura 44. Solera de soporte para el colector y ángulo de anclaje del colector a base metálica. Elaboración propia*

Para el diseño interior del secador solar, es decir la cámara de secado se implementaron tres charolas. Para ello se determinó que los ángulos de soporte estuvieran a 90°, lo permite que las charolas se encuentren en una correcta posición para mantener las mallas en las cuales se coloca el producto a desecar.

Las charolas de la cámara de secado de  $1\frac{1}{2}$  pulgadas, así como también la estructura interna de los alvéolos con perfil angular de aluminio calibre número 18 y un canal metálico de aluminio calibre número 24 de 6.35 cm de ancho, se observan en la (Ver Figura 45).



a) Ángulo de soporte para charolas



b) Estructura alveolos

Figura 45. Ángulo de soporte para las charolas en la cámara de secado y estructura interna de los alveolos.  
Elaboración propia