



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de deshidratador de alimentos casero con  
instrumentos reciclables**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de  
Bachiller en Ingeniería Mecánico - Eléctrica

**José Santiago Alcarazo Tenorio  
César Alejandro Cisneros Carrasco  
Melannie Sharon García Olazábal  
James Francisco Ordinola Armas**

**Asesor:  
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Piura, setiembre de 2020**



## Resumen Analítico-Informativo

### **Diseño de deshidratador de alimentos casero con instrumentos reciclables**

**Alcarazo Tenorio, José Santiago; Cisneros Carrasco, César Alejandro; García Olazábal, Melannie Sharon y Ordinola Armas, James Francisco**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Bachiller en Ingeniería Mecánico-Eléctrica**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, Setiembre de 2020**

**Palabras claves:** Análisis termodinámico / deshidratador / energía solar / mecanismos de transferencia de calor / secado.

**Introducción:** El presente trabajo de investigación se centra en el diseño de un deshidratador solar a partir de la modelación por medio de simulaciones tomando en cuenta el análisis termodinámico y los parámetros influyentes, los cuales van a permitir describir el comportamiento del sistema y fruta a utilizar, con la finalidad que se brinde un proceso confiable y eficiente, donde el producto a evaluar obtenga los resultados esperados.

**Metodología:** En primer lugar, se ha realizado un análisis matemático con el fin de establecer un balance de masa en el proceso de deshidratación, luego, un análisis térmico estableciendo así las pérdidas de calor en todo el sistema y además encontrar el calor requerido para el proceso. Seguido se procedió a analizar los parámetros de relevancia recopilados de la estación meteorológica de la Universidad de Piura. Así mismo, estos datos fueron los parámetros de entrada en las simulaciones en los diferentes softwares: Matlab, SolidWorks y ANSYS. Por último, se analizaron los resultados obtenidos en dichas simulaciones.

**Resultados:** Los parámetros relevantes para el análisis son: irradiancia, temperatura ambiente, humedad y velocidad del viento. Los resultados obtenidos de temperatura en los diferentes puntos de análisis del deshidratador se compararon según el software de simulación empleado; los cuales difieren debido a que SolidWorks es un programa que se basa en la simulación de elementos finitos y análisis tridimensional, el cual es más preciso que Matlab, puesto que el segundo se basa en un análisis bidimensional por ecuaciones que describen comportamientos del sistema en el tiempo las cuales cuentan con márgenes de error por defecto.

**Conclusiones:** El diseño del deshidratador considera tres orificios de entrada el cual permite versatilidad en el control del flujo másico del aire de entrada, según las condiciones ambientales que se puedan dar durante su funcionamiento. A partir de las simulaciones y resultados obtenidos, se pudo visualizar los efectos del secado en el banano y las temperaturas que se dan en el proceso de deshidratación.

**Fecha de elaboración del resumen:** 09 de Setiembre de 2020

## Analytical-Informative Summary

### **Diseño de deshidratador de alimentos casero con instrumentos reciclables**

**Alcarazo Tenorio, José Santiago; Cisneros Carrasco, César Alejandro; García Olazábal, Melannie Sharon y Ordinola Armas, James Francisco**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Bachiller en Ingeniería Mecánico-Eléctrica**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, Setiembre de 2020**

**Keywords:** Dryer / drying / heat transfer mechanisms / solar energy / thermodynamic analysis.

**Introduction:** The present research work is focused on the design of a solar dehydrator from the modeling using simulations taking into account the thermodynamic analysis and the influential parameters, which are going to allow to describe the behavior of the system and fruit to be used, to provide a reliable and efficient process, where the product to be evaluated obtains the expected results.

**Methodology:** First, a mathematical analysis is performed to establish a mass balance in the dehydration process, then a thermal analysis is performed that establishes the heat losses in the entire system and also finds the heat required for the process. Then, the relevant parameters collected from the University of Piura meteorological station are analyzed. Furthermore, the data is taken as input parameters in the simulations of the different programs: Matlab, SolidWorks, and ANSYS. Finally, the results obtained in the simulations are analyzed and compared.

**Results:** The relevant parameters for analysis are irradiation, ambient temperature, humidity, and wind speed. The results obtained from the temperature at the different analysis points of the dehydrator are compared according to the simulation software used. They differ because SolidWorks is a program based on finite element simulation and three-dimensional analysis, which is more accurate than Matlab, while the latter is based on an analysis of two-dimensional equations that describe system behavior with predetermined margins of error over time.

**Conclusions:** The main limitation of this project is that it was not possible to carry out the construction and, therefore, the experimental phase, in which the results obtained in the simulation software would be validated. The design of the dehydrator considers three inlet holes that allow versatility in the control of the air mass inlet flow, according to the environmental conditions that occur during its operation. Based on the simulations and the results obtained, it is possible to visualize the effects of drying on banana slices and the temperatures that are produced in the dehydration process.

**Summary date:** September 9<sup>th</sup>, 2020

## Tabla de contenidos

|   |    |
|---|----|
| Introducción.....                                   | 1  |
| Capítulo 1 Introducción e información general ..... | 3  |
| 1.1. Estado del arte .....                          | 3  |
| 1.2. Productos para hacer el estudio .....          | 5  |
| 1.2.1. Banano.....                                  | 5  |
| Capítulo 2 Revisión bibliográfica .....             | 7  |
| 2.1. Fundamentos de secado.....                     | 7  |
| 2.1.1. Tipos de humedades .....                     | 7  |
| 2.1.2. Cuerpos húmedos y cuerpos higroscópicos..... | 8  |
| 2.2. Potencial solar .....                          | 8  |
| 2.3. Identificación y descripción del sistema ..... | 8  |
| 2.4. Elementos principales del deshidratador.....   | 9  |
| 2.4.1. Colector solar .....                         | 9  |
| 2.4.2. Cámara de secado.....                        | 10 |
| 2.5. Tipos de deshidratadores .....                 | 10 |
| 2.5.1. Deshidratador solar directo .....            | 10 |
| 2.5.2. Deshidratador solar indirecto .....          | 11 |
| 2.5.3. Deshidratador solar mixto .....              | 12 |
| 2.6. Radiación térmica.....                         | 13 |
| 2.7. Conductividad térmica .....                    | 14 |
| 2.8. Calor latente .....                            | 14 |
| 2.9. Mecanismos de transferencia de calor.....      | 15 |
| 2.9.1. Conducción.....                              | 15 |
| 2.9.2. Convección.....                              | 16 |
| 2.9.2.1. Convección forzada.....                    | 17 |
| 2.9.3. Radiación.....                               | 17 |

|  |    |
|--|----|
| 2.10. Propiedades térmicas de los alimentos .....                              | 18 |
| 2.11. Parámetros presentes en el proceso de deshidratación .....               | 18 |
| 2.11.1. Radiación.....   | 18 |
| 2.11.2. Convección.....  | 18 |
| 2.11.3. Conducción.....  | 18 |
| 2.11.4. Transferencia de masa .....  | 18 |
| 2.11.5. Calor latente .....  | 19 |
| 2.11.6. Presión parcial de vapor .....   | 19 |
| 2.11.7. Capilaridad .....  | 19 |
| 2.11.8. Difusión.....  | 19 |
| 2.11.9. Humedad critica .....  | 19 |
| 2.11.10. Humedad relativa .....  | 20 |
| 2.11.11. Temperatura.....  | 20 |
| Capítulo 3   Diseño del deshidratador .....                                    | 21 |
| 3.1. Tipo de deshidratador.....  | 21 |
| 3.2. Parámetros que influyen en el análisis del diseño del deshidratador ..... | 21 |
| 3.2.1. Número de rodajas de banano: .....                                      | 23 |
| 3.3. Características del producto a secar .....                                | 24 |
| 3.3.1. Generalidades del banano orgánico.....                                  | 24 |
| 3.3.2. Proceso de deshidratación .....   | 25 |
| 3.3.2.1. Selección .....   | 25 |
| 3.3.2.2. Lavado y pelado .....   | 26 |
| 3.3.2.3. Cortado .....   | 26 |
| 3.3.2.4. Pre-tratamiento .....   | 26 |
| 3.3.2.5. Secado .....  | 27 |
| 3.4. Material y equipo experimental.....                                       | 27 |
| 3.4.1. Madera.....   | 27 |
| 3.4.2. Vidrio.....   | 27 |
| 3.4.3. Hierro galvanizado .....  | 28 |
| 3.4.4. Poliestireno expandido .....  | 28 |
| 3.5. Diseño de deshidratador .....   | 29 |
| 3.6. Balance de materia .....  | 29 |
| 3.7. Potencia requerida para deshidratar banano.....                           | 33 |
| 3.8. Resistencias térmicas.....  | 34 |

|  |    |
|--|----|
| 3.8.1. Radiación solar .....   | 34 |
| 3.8.2. Convección forzada.....   | 35 |
| 3.8.3. Transmisión de calor en el interior del deshidratador .....                         | 36 |
| 3.8.4. Flujo de calor por medio de tres paredes.....                                       | 36 |
| 3.8.5. Distribución de resistencias internas del sistema .....                             | 37 |
| 3.8.6. Sistema de distribución de resistencias final del sistema .....                     | 38 |
| 3.8.6.1. Cálculo de resistencia térmica por radiación en el vidrio .....                   | 39 |
| 3.8.6.2. Resistencia térmica por conducción en el vidrio.....                              | 40 |
| 3.8.6.3. Resistencia térmica por convección del aire en el exterior del deshidratador..... | 40 |
| 3.8.6.4. Resistencia térmica por convección del aire que ingresa al deshidratador .....    | 41 |
| 3.8.6.5. Resistencia térmica por radiación de la placa interior del deshidratador .....    | 43 |
| 3.8.6.6. Resistencia térmica por conducción de la placa interior del deshidratador .....   | 44 |
| 3.8.6.7. Resistencia térmica por conducción del poliestireno (EPS).....                    | 44 |
| 3.8.6.8. Resistencia térmica por conducción de la madera.....                              | 44 |
| 3.8.6.9. Resistencia térmica por convección que sale del deshidratador.....                | 45 |
| 3.8.6.10. Resistencias equivalentes .....  | 46 |
| 3.8.6.11. Cálculo de flujo calorífico.....   | 47 |
| Capítulo 4 Modelación matemática y análisis paramétrico del deshidratador.....             | 49 |
| 4.1. Etapa de procesamiento de datos.....  | 49 |
| 4.2. Simulación.....   | 50 |
| 4.2.1. Parámetros ambientales.....   | 50 |
| 4.2.2. Parámetros de la cubierta de vidrio .....   | 51 |
| 4.2.3. Parámetros de la placa absorbente.....  | 51 |
| 4.2.4. Parámetros de material de almacenamiento térmico .....                              | 51 |
| 4.2.5. Parámetros del colector solar .....   | 52 |
| 4.3. Análisis matemático .....   | 52 |
| 4.4. Análisis de resultados.....   | 53 |
| 4.4.1. Gráficas de análisis de variación de parámetros en Matlab .....                     | 53 |
| 4.4.2. Análisis en SolidWorks de la transferencia de calor en el sistema .....             | 56 |
| 4.4.2.1. Diseño del deshidratador .....  | 56 |
| 4.4.3. Análisis en ANSYS de transferencia de calor en una rodaja de plátano.....           | 60 |
| 4.5. Comparación de resultados de simulaciones.....  | 63 |
| Capítulo 5 Mantenimiento del deshidratador.....  | 65 |
| 5.1. Mantenimiento de secadores solares .....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| 5.1.1. Tareas de mantenimiento en cada uso del secador.....           | 65 |
| 5.1.2. Tareas de mantenimiento a largo plazo.....                     | 65 |
| Capítulo 6 Impacto del proyecto.....                                  | 67 |
| 6.1. Identificación del problema.....                                 | 67 |
| 6.2. Propuesta de proyecto sostenible.....                            | 68 |
| 6.3. Producción de banano.....  | 69 |
| 6.3.1. Regional.....  | 69 |
| 6.3.2. Nacional.....  | 69 |
| 6.3.3. Global.....  | 69 |
| 6.4. Sostenibilidad y viabilidad.....                                 | 70 |
| 6.4.1. Impacto social.....  | 70 |
| 6.4.2. Impacto global.....  | 71 |
| 6.4.3. Impacto económico.....   | 71 |
| 6.4.4. Impacto ambiental.....   | 71 |
| Conclusiones.....   | 73 |
| Recomendaciones.....  | 75 |
| Referencias bibliográficas.....                                       | 77 |
| Apéndices.....  | 81 |
| Apéndice A: Planos del deshidratador diseñado.....                    | 83 |
| Apéndice B: Planos de la placa absorbente.....                        | 84 |
| Anexos.....   | 85 |
| Anexo A: Datos de estación meteorológica en Universidad de Piura..... | 87 |
| Anexo B: Carta psicrométrica.....                                     | 88 |
| Anexo C: Datos SENAMHI.....   | 89 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Clasificación de secadores solares y métodos de secado.....                        | 8  |
| Figura 2. Principio básico de funcionamiento de un colector solar. ....                      | 9  |
| Figura 3. Colector solar de placa plana. ....  | 10 |
| Figura 4. Deshidratador solar directo.....   | 11 |
| Figura 5. Deshidratador solar indirecto.....   | 12 |
| Figura 6. Deshidratador solar mixto.....   | 12 |
| Figura 7. Espectro de la radiación electromagnético. ....                                    | 13 |
| Figura 8. Mecanismos de conducción de calor en diferentes fases.....                         | 15 |
| Figura 9. Distribución de las rodajas de banano en la bandeja .....                          | 23 |
| Figura 10. Pasos para realización del proceso de deshidratación.....                         | 25 |
| Figura 11. Efecto invernadero ocasionado por los rayos solares que atraviesan el vidrio..... | 28 |
| Figura 12. Vista isométrica del deshidratador.....   | 29 |
| Figura 13. Resistencias térmicas por radiación solar .....                                   | 35 |
| Figura 14. Resistencias térmicas por convección.....   | 35 |
| Figura 15. Resistencias térmicas por convección forzada.....                                 | 36 |
| Figura 16. Sistema de transferencia de calor en el interior del deshidratador.....           | 36 |
| Figura 17. Sistema de transferencia de calor.....  | 37 |
| Figura 18. Resistencias por conducción .....   | 37 |
| Figura 19. Distribución de resistencias térmicas.....  | 37 |
| Figura 20. Sistema de resistencias térmicas .....  | 38 |
| Figura 21. Temperatura de la placa absorbente con y sin material de aislamiento térmico..... | 54 |
| Figura 22. Variación de las temperaturas con diámetro de 8 cm en las entradas y salidas..... | 54 |
| Figura 23. Variación de las temperaturas con diámetro de 6 cm en las entradas y salidas..... | 55 |
| Figura 24. Variación de las temperaturas con dimensiones de 1.5 x 1.5 m en el colector.....  | 55 |
| Figura 25. Vista alzada de la simulación térmica.....  | 57 |
| Figura 26. Vista isométrica de simulación térmica del plano frontal.....                     | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27. Vista isométrica de simulación térmica del plano frontal posterior .....   | 58 |
| Figura 28. Vista lateral de la distribución térmica .....                             | 59 |
| Figura 29. Vista de trayectoria de flujo de temperaturas .....                        | 59 |
| Figura 30. Vista de la velocidad en trayectoria de flujo.....                         | 60 |
| Figura 31. Representación de la rodaja de banano en SolidWorks .....                  | 60 |
| Figura 32. Simulación del comportamiento del banano durante el proceso de secado..... | 61 |
| Figura 33. Incremento de temperatura del tiempo de secado de la rodaja de banano..... | 62 |
| Figura 34. Estadística de peruanos con obesidad.....                                  | 68 |
| Figura 35. Evolución de la exportación piurana 2009-2014 .....                        | 69 |
| Figura 36. Exportación peruana de bananos al mundo y la UE .....                      | 70 |



## Lista de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Tabla de parámetros .....  | 21 |
| Tabla 2. Propiedades de deshidratación del banano.....                                  | 24 |
| Tabla 3. Propiedades termodinámicas del banano .....                                    | 24 |
| Tabla 4. Grados de madurez del banano .....   | 26 |
| Tabla 5. Tabla resumen de valores.....  | 33 |
| Tabla 6. Resumen de datos de propiedades del aire a 28.14°C.....                        | 34 |
| Tabla 7. Resumen de datos de radiación en el vidrio.....                                | 39 |
| Tabla 8. Resumen de datos.....  | 41 |
| Tabla 9. Resumen de datos de propiedades del aire a 39.07°C.....                        | 42 |
| Tabla 10. Resumen de datos de radiación en el interior.....                             | 43 |
| Tabla 11. Resumen de datos.....   | 45 |
| Tabla 12. Resumen de datos de propiedades del aire a 47.5 °C.....                       | 46 |
| Tabla 13. Tabla promedio de los parámetros de entrada.....                              | 49 |
| Tabla 14. Parámetros ambientales para en análisis del deshidratador .....               | 50 |
| Tabla 15. Parámetros de la cubierta de vidrio para el análisis del deshidratador .....  | 51 |
| Tabla 16. Parámetros de la placa absorbente para el análisis del deshidratador.....     | 51 |
| Tabla 17. Parámetros del material de almacenamiento térmico del deshidratador.....      | 51 |
| Tabla 18. Parámetros del colector solar para el análisis del deshidratador.....         | 52 |
| Tabla 19. Incremento de la temperatura de una rodaja de plátano simulado en ANSYS. .... | 62 |
| Tabla 20. Comparación de resultados .....   | 63 |



## Introducción

El proceso de deshidratación a lo largo de la historia ha sido una herramienta útil para la conservación de productos agrícolas manteniendo propiedades como sabor, propiedades organolépticas, entre otras, con la finalidad de darles estos productos mayor durabilidad y así poder hacer una mayor distribución y venta en diferentes mercados. Además de hacer uso de la energía solar hace que sea una opción viable y económica.

Este proceso se caracteriza principalmente por convertir la energía solar en calor y por medio de los mecanismos de transferencia de calor generar en el producto la remoción de su humedad; teniendo en cuenta siempre los distintos parámetros que tienden a influir; ya sea en el momento del análisis termodinámico, así como en el diseño del deshidratador solar. Por esto, el presente proyecto de investigación tiene como fin analizar y simular el proceso de deshidratación para así obtener los diferentes parámetros influyentes en el proceso; y en consecuencia elaborar un diseño de un deshidratador solar que sea capaz de brindar un proceso confiable y eficiente, donde el producto a evaluar tenga los resultados esperados.

En el primer capítulo se hace una revisión de la bibliografía referente al tema central de la investigación a través del estado del arte, en el cual se presentan diferentes estudios de deshidratadores, los parámetros que influyen en el sistema, los parámetros de la carga, las simulaciones que se hicieron en algunos casos y sus conclusiones. Además, se seleccionó el banano como fruta para deshidratar, indicando sus parámetros que influyen en el proceso.

En el segundo capítulo, se hace una descripción de las diferentes configuraciones de deshidratadores que se encontraron en la literatura, y se citan ventajas y desventajas de cada uno. Cabe resaltar que se ha escogido el tipo de deshidratador solar directo con placa plana debido a sus características y aplicación. Además, se hace una revisión de todos los parámetros que influyen en el sistema, así como también la descripción de los mecanismos de transferencia de calor que se ven involucrados en el proceso de deshidratación.

En el tercer capítulo, se ha tomado en cuenta el diseño del deshidratador, en el cual se describen distintas características que debe tener el prototipo a diseñar, incluyendo materiales

de construcción, ángulo de inclinación del área de captación, parámetros que influyen y planos del prototipo. Además, se han desarrollado cálculos de balance de materia y también se incluye el análisis de las resistencias térmicas de las formas de transferencia de calor, en el cual se describen los mecanismos de transferencia de calor, siendo el de mayor influencia la convección debido al aire caliente que fluye en el interior del deshidratador utilizado para deshidratar el producto, que en este caso es el banano.

En el cuarto capítulo se realizó lo correspondiente a la modelación matemática del proceso de deshidratación, así como un análisis paramétrico. Para ello se procedió a solicitar datos a la estación meteorológica de la Universidad de Piura de los parámetros más influyentes en el sistema, los cuales fueron: irradiancia, velocidad del viento y temperatura ambiente. Se hizo con la finalidad de promediar y modelar el proceso en un rango óptimo de trabajo. Para ello se tomaron de referencia diferentes ecuaciones termodinámicas que engloban los parámetros antes mencionados y también características de diseño del deshidratador solar; además de investigaciones donde se aplican a similares sistemas (Uriol, 2016). Dentro del desarrollo y análisis, se variaron diferentes parámetros tanto geométricos como energéticos con el fin de mostrar en gráficas los distintos comportamientos que tiene el deshidratador solar de estudio.

En el quinto capítulo, se describe la secuencia de pasos para la correcta utilización del deshidratador. Además, se describe los pasos para la construcción del mismo teniendo como material principal la madera. Se da una serie de recomendaciones para obtener una mayor durabilidad y un correcto mantenimiento obteniendo así, resultados óptimos siempre.

En el sexto capítulo, denominado Impacto del proyecto se identifica la problemática a solucionar con la implementación del deshidratador, determinando de esta manera una propuesta de desarrollo sostenible que cumpla con los aspectos fundamentales de sostenibilidad y viabilidad para proceder con su aplicación. Debido a esto, se realiza una investigación sobre la producción de banano en el entorno regional, nacional y global. Por último, se analiza el impacto que generaría el proyecto en el aspecto social, económico, global y ambiental.

## Capítulo 1

### Introducción e información general

#### 1.1. Estado del arte

En (2015) se usa el método de iteración de punto fijo en el software Matlab para calcular la cantidad de energía que absorbe el colector y la temperatura del flujo de salida del deshidratador. Esto se realiza tras un estudio de los mecanismos de transferencia de calor en un secador solar el cual finaliza en un balance de energía entre el colector solar y los alimentos. Además, se hace uso de ANSYS Fluent para la simulación del colector y el comportamiento de los parámetros que intervienen en su análisis como la velocidad de aire, la temperatura y la presión dentro de él. Se concluyó que, de los quince sólidos utilizados en el interior de la cámara de secado, todos tenían una distribución de temperatura superficial no uniforme debido a que la interacción del aire caliente con la carga no es distribuida de manera uniforme, haciendo énfasis en que se considera que el flujo que se encuentra en el colector es turbulento.

Utiliza las ecuaciones de (1986) para calcular valores de algunas propiedades térmicas de los alimentos y propiedades del sólido como densidad, calor específico y conductividad térmica las cuales serán posteriormente utilizados en la herramienta ANSYS Fluent para simular la distribución de temperatura en estado estacionario del colector.

En (2016) se realizó un estudio que determinó que dependiendo del fruto a deshidratar se tendrá que retirar distintas cantidades de agua pues cada uno posee su propio porcentaje mínimo de agua para poder conservarse. Tiene como objetivo reducir el porcentaje de humedad hasta el 12% del valor mínimo utilizando dispositivos de medición de humedad en la entrada, durante y a la salida del colector solar de placa plana para el control de la cantidad de agua retirada de la fruta y el estado final del producto. Asimismo, se hizo un análisis térmico del colector solar utilizando la herramienta ANSYS Fluent en un tiempo de exposición de dos, cuatro y seis horas para poder calcular el tiempo óptimo de exposición en el que el colector logra su máxima temperatura deseada, analizándose parámetros como temperatura de salida del colector, eficiencia del sistema, humedad deseada del producto y las propiedades del fruto escogido. Concluyó escogiendo el colector solar de placa plana ya que presentaba mayor ventaja en cuanto

a la eficiencia térmica y el paso del flujo de aire con respecto de otras geometrías posibles. Ya que se tomó como primordial el aprovechamiento máximo de la energía solar, lo cual se consigue con dicha placa plana debido a que la incidencia de radiación es directa y se distribuye en términos generales, equitativamente, para asegurar que la temperatura sea lo más regular posible en todos los puntos del colector.

En (2016) se hace un estudio termodinámico de los diferentes colectores solares de placa plana utilizando el software Matlab para analizar los cambios que producen al variar la longitud, ancho, flujo másico y ángulo de inclinación del colector solar en algunos parámetros como la temperatura y la humedad relativa del aire a la salida. De acuerdo con esto, se escogió la configuración más adecuada para el tipo de aplicación en el cual resaltó el secador indirecto para el proceso de secado del cacao orgánico. Se concluye que, si se aumenta el número de pasos en el colector, también lo hace la temperatura del aire a la salida de este, como se veía en (Sánchez, 2015). Sin embargo, se hace la salvedad de que depende de la ubicación de los elementos que forman parte de la configuración del colector solar. Otra conclusión es que el valor adecuado del ángulo de inclinación para el colector para Piura es de 15 a 20 grados con orientación norte-sur.

En investigaciones recientes como (2017) se hacen estudios acerca de un sistema combinado de secado como solución de diseño para optimizar el rendimiento de los sistemas de secado solar convencionales tratando de no afectar las propiedades organolépticas de los productos, los cuales fueron jaca, plátano y melón amargo. En los resultados se observa que debido a la estructura del deshidratador se tuvo una distribución uniforme de calor en los cultivos y que no se afectó el sabor en los productos deshidratados. Un aspecto para tomar en cuenta es que las condiciones climáticas diarias afectan a la contribución de energía absorbida.

En (2018) la cámara de secado tenía doble pared de aislamiento con fibra de vidrio de 5 cm de espesor para evitar pérdidas de energía. Un ventilador de 12 V DC fue conectado al secador para inducir convección forzada y esto fue conectado al regulador de velocidad que fue conectado a la batería de 12 V DC. El ventilador tiene suficiente potencia para proporcionar la velocidad de aire necesaria y superar la presión de retroceso causada por el aire que puede ser fácilmente controlada para compensar la variación de la temperatura. El interior de la pared fue pintado con alquitrán de hulla para mejorar la absorción y emisión de energía solar. Se concluyó, que cuanto más alta es la velocidad del ventilador, el enfriamiento por convección es mayor y la temperatura del aire de secado es más baja.

Por otro lado, en (2019) se presentan mejoras en los secadores solares existentes, diferentes tipos de disposiciones para secadores solares enfatizando en los híbridos y las

principales bondades y rendimientos de cada estructura dependiendo de la aplicación en la que será empleado. Se considera como estudio futuro el análisis del potencial de almacenamiento de energía térmica en cascada para aumentar la continuidad de la temperatura en un período más largo, mitigar las horas con ausencia de sol y para mejorar la calidad del secado. Se recomienda el uso de un simulador CFD para estudiar la optimización del rendimiento del secador solar.

## **1.2. Productos para hacer el estudio**

Últimamente, las frutas secas o deshidratadas son un producto que está ganando popularidad en el mercado puesto que es fácil de empaquetar y almacenar. Además, a diferencia de las frutas frescas evita el deterioro (Myperuglobal, 2019).

Se escogió el banano porque es la fruta que tiene menor humedad inicial, es decir cuando está fresco, lo cual es un punto favorable de partida en el proceso de deshidratación.

### **1.2.1. Banano**

El banano es uno de los productos de exportación más importantes pues es considerado un alimento básico por su gran contenido de nutrientes. Se caracteriza por su proceso de producción ya que es cultivado sin haber hecho uso de sustancias químicas que ocasionan problemas para la salud de las personas. En los últimos años, Perú está teniendo un gran crecimiento como exportador en el mercado mundial de banano orgánico, siendo Piura, Tumbes y Lambayeque las centrales productoras de este alimento. En su proceso de deshidratación se necesita tener en cuenta diversos factores tanto del banano orgánico como del ambiente al que será expuesto, por ejemplo, mantener este alimento a una temperatura de secado constante. Teniendo este flujo de calor controlado, la deshidratación se dará en las mejores condiciones posibles ya que el banano no tendrá cambios bruscos de temperatura. Para culminar este proceso, la humedad en el banano deshidratado debe llegar a los valores presentados en la Tabla 2. El tiempo secado dependerá de la masa del banano previamente cortado y pelado, el estado de madurez y el tipo de mecanismo utilizado (Cocina Solar, 2018) (Hinojosa, 2008) (Vega, Coronel, Timaná, Temoche, & Vargas, 2018).



## Capítulo 2

### Revisión bibliográfica

#### 2.1. Fundamentos de secado

Dentro de la producción industrial en el sector alimenticio, el secado cumple un rol muy importante ya que mejora de calidad del producto y su obtención es simple.

El secado es un proceso que permite reducir o remover la mayor proporción de agua o humedad contenida en un producto hasta llegar a un nivel delimitado por condiciones de temperatura, humedad y velocidad de secado, entre otros.

Para este proceso, es necesario de un emisor de calor que evapore la humedad y un receptor que la absorba para que no se produzca el vapor de agua que se forma a partir de la superficie del producto secado.

##### 2.1.1. Tipos de humedades

Se identificaron cinco tipos de humedades (Gallegos Casillas, Medina Nieto, & Pérez Pérez, 2015):

La humedad de equilibrio es representada por " $X^*$ " y consiste en un sólido o sustancia que se encuentra en equilibrio con una presión parcial de vapor. Esto ocurre cuando este es expuesto a una corriente gaseosa y pierde o aumenta su humedad hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa.

La humedad ligada, por su parte, es el contenido de agua retenido en las paredes celulares o poros del sólido cuando este ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura. Mientras que, la humedad no ligada, se refiere a la humedad de un sólido que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

La humedad libre ( $X - X^*$ ), es el exceso de humedad de un sólido respecto a la humedad de equilibrio. Solo este tipo de humedad se puede evaporar y depende de la concentración del vapor en el gas.

Por último, la humedad crítica ( $X_C$ ) representa el contenido promedio de humedad cuando concluye el periodo de velocidad constante.

### 2.1.2. Cuerpos húmedos y cuerpos higroscópicos

Se denomina cuerpo higroscópico a aquellos capaces de atraer agua sea en forma líquida o vapor, suelen aparecer cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido es menor que la tensión de vapor del agua a la misma temperatura.

Por otro lado, al igualarse la tensión del vapor de agua a una temperatura determinada con la presión del vapor del agua del producto aparece un cuerpo húmedo (Ibergy, s.f.).

### 2.2. Potencial solar

Es el aprovechamiento de la radiación solar cuya finalidad es convertirla en otro tipo de energía. Se puede adoptar la energía solar como una fuente de calentamiento de aire aprovechando la radiación solar que se emite anualmente en el Perú, la cual varía entre 4.5 – 5.6 kWh/m<sup>2</sup> al día y más precisamente en la región de Piura que es de 6,0 – 6,5 kWh/m<sup>2</sup> al día (Tamayo Pereyra, 2011).

### 2.3. Identificación y descripción del sistema

Los sistemas de secado solar se clasifican según los componentes y el modo de utilización de la energía solar, representado en la Figura 1.

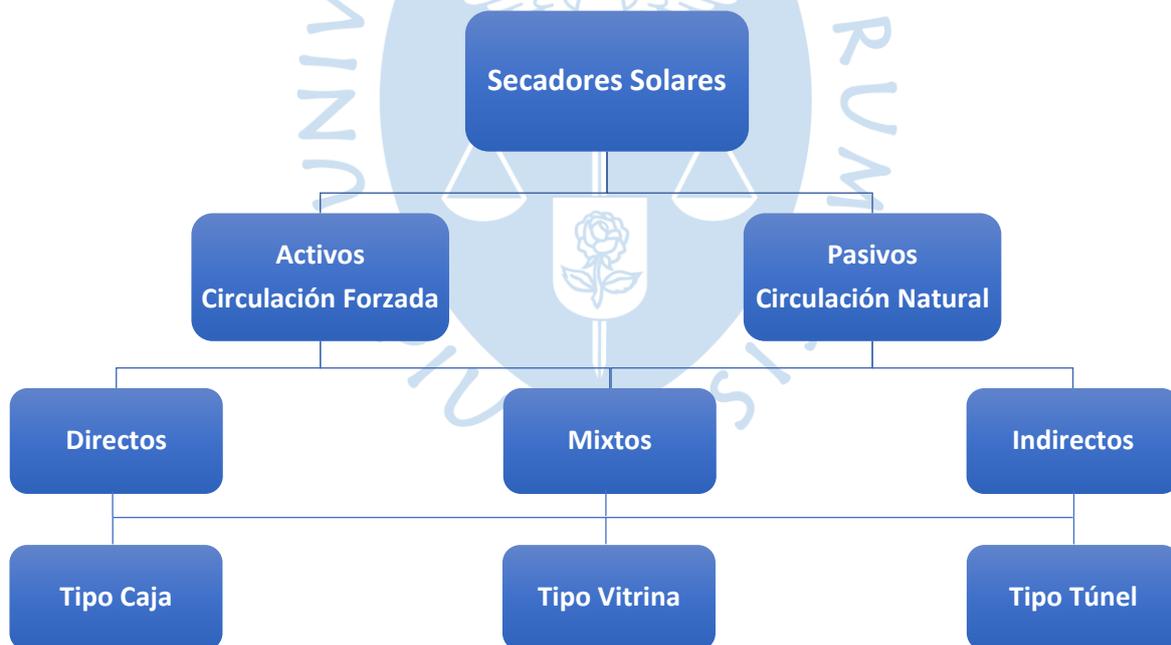


Figura 1. Clasificación de secadores solares y métodos de secado.

Fuente: Tomado y adaptado de “*Construcción de un secador solar de tipo indirecto para la deshidratación de productos agrícolas*” (Chan Gonzalez, 2013).

Los secadores activos son caracterizados por una circulación forzada del aire, por ejemplo, mediante un ventilador, en cambio, los secadores pasivos emplean la circulación natural del aire.

En cada grupo, existen tres diferentes tipos, que son: directo, indirecto y mixto. Para este trabajo se empleará los secadores pasivos. En un secador solar pasivo, el aire se calienta y circula naturalmente por la fuerza de flotabilidad o como resultado de la presión del viento o en combinación de ambos, estos siguen siendo una práctica común en muchas regiones mediterráneas, tropicales y subtropicales, especialmente en África y Asia o en pequeñas comunidades agrícolas. Estos son primitivos, económicos en construcción con materiales disponibles localmente, fáciles de instalar y operar especialmente en sitios alejados de la red eléctrica. Los secadores pasivos son los más adecuados para secar pequeños lotes de frutas y verduras como plátano, piña, mango, papa, zanahorias, etc. (Visavale, 2012).

## 2.4. Elementos principales del deshidratador

### 2.4.1. Colector solar

Un colector solar es un dispositivo diseñado para funcionar como un intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor, en la cual, la fuente de energía radiante es el Sol, que llega al colector sobre una cubierta transparente, reflejando una parte hacia la atmósfera y otra se transfiere hacia una superficie que se encarga que transferirlo en forma de energía térmica a un fluido, que puede ser agua o aire que circula por tubos o ductos del colector. Este proceso de captación se basa en el efecto invernadero.

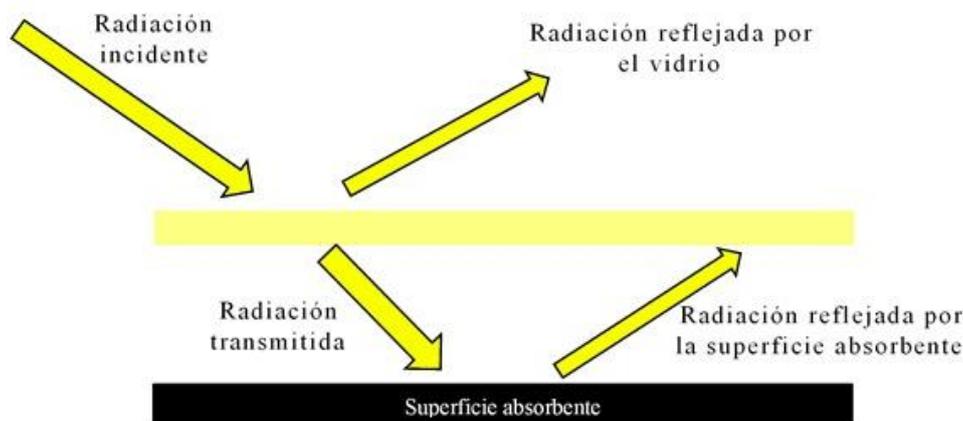


Figura 2. Principio básico de funcionamiento de un colector solar.

Fuente: Tomado de “*Construcción de un secador solar de tipo indirecto para la deshidratación de productos agrícolas*” (Chan Gonzalez, 2013).

Los colectores solares de placa plana son los más comunes o utilizados en secado de productos agrícolas, diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, llegan a proporcionar temperaturas menores a 90°C. Estos colectores, con respecto a otros colectores, utilizan la energía solar directa y difusa, no necesitan mucho mantenimiento, son más fáciles de construir y más económicos. Sus aplicaciones

principales son el calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos.

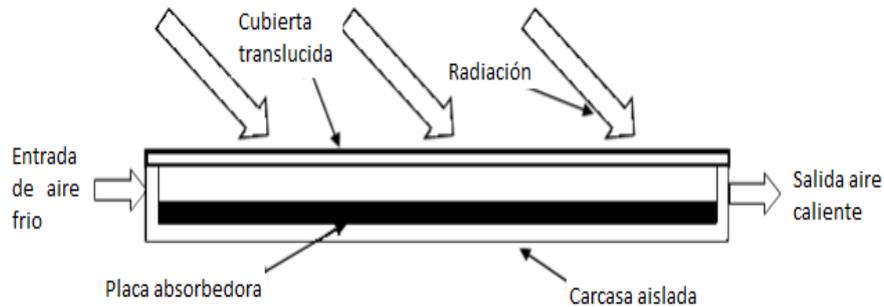


Figura 3. Colector solar de placa plana.

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.4.2. Cámara de secado

Utilizado para las tareas de secado, en situaciones donde sea necesario una baja humedad del aire. La cámara de secado es la zona donde van a actuar los diferentes procesos de transferencia tanto de calor como de masa, con la finalidad de obtener el producto deshidratado. Su construcción va a tener en cuenta el volumen de producto a deshidratar, el sentido de la corriente de aire y preferencias del fabricante (García E. , Mejía, Mejía, & Valencia, 2012).

### 2.5. Tipos de deshidratadores

A continuación, se presentan distintas configuraciones de deshidratadores y sus principales ventajas y desventajas. El tipo de deshidratador que se ha escogido para esta investigación es el directo de placa plana.

#### 2.5.1. Deshidratador solar directo

En este tipo de sistemas, se tiene el colector y la cámara de secado juntos, en la cual, la cámara también funcionaría como colector porque recibe la radiación solar. En estos deshidratadores parte de la radiación se transmite al interior de la cámara, elevando la temperatura del aire. Se debe tener en cuenta que parte de la radiación solar lo absorbe el producto, ayudando a acelerar la evaporación del agua. Estos sistemas son por lo general más económicos, especialmente en los secadores de menor tamaño.

En estos sistemas las pérdidas de calor son producidas por convección y evaporación, es decir, cuando “la humedad es retirada por el flujo de aire, que entra por la parte inferior de la cámara y sale por la parte superior de la misma” (Bravo Avalos, Baño Ayala, & Cajamarca Carrasco, 2018). Las paredes del sistema deben operar como un aislante para evitar las pérdidas de calor por conducción.

Estos secadores son adecuados para el secado de productos agrícolas, especias y hierbas, etc., construidos normalmente con un área de secado de 1 a 2  $m^2$  y capacidades de 10 a 20 kg.

La circulación de aire requerida es mantenida por el aire cálido y húmedo que sale a través de la ventilación superior bajo la acción de las fuerzas de flotabilidad y genera succión de aire fresco desde la entrada de la base (Visavale, 2012).

Estos secadores pueden proporcionar temperaturas entre 20°C y 25°C superiores a la temperatura ambiente (Masías, 2019).

Las operaciones que se realizan en estos sistemas son:

- El agente de secado puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado (nitrógeno, por ejemplo), o vapor de agua sobrecalentado (De la Vega Sanchez, 2017).
- El secado viene dado gracias a la convección entre el aire caliente del medio y el producto húmedo, en donde el flujo de gases extrae el líquido vaporizado y separa el vapor (De la Vega Sanchez, 2017).

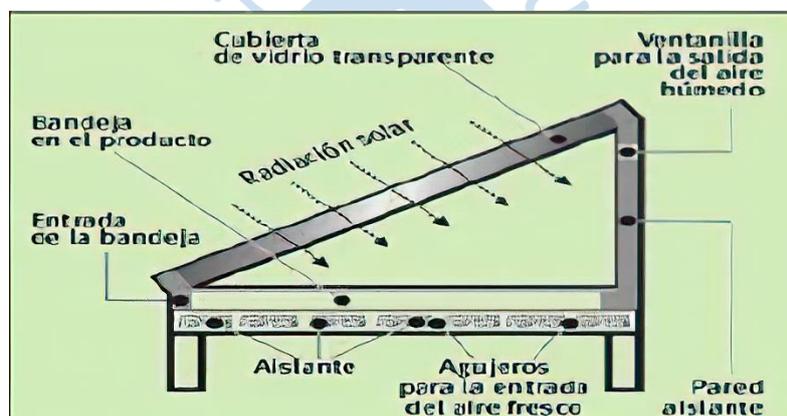


Figura 4. Deshidratador solar directo.

Fuente: Tomado de “*Diseño de un deshidratador mixto indirecto de frutas*” (Bravo Avalos, Baño Ayala, & Cajamarca Carrasco, 2018)

### 2.5.2. Deshidratador solar indirecto

En estos sistemas, el colector solar y la cámara de secado están separados. El colector solar encargado de calentar el aire, y la cámara de secado se coloca el producto en varias bandejas, un punto diferente con respecto al directo que solo puede incorporar 1 bandeja o adaptarlo para 2 bandejas, pero su construcción sería más compleja.

El colector solar y la cámara de secado van unidos de tal manera en que el aire caliente ingrese por la parte inferior de la cámara, fluye a través de las bandejas dispuestas y es expulsado por una salida en la parte superior (De la Vega Sanchez, 2017). Estos sistemas pueden llegar hasta una temperatura superior de 30°C más con respecto a la temperatura ambiente (Masías, 2019).

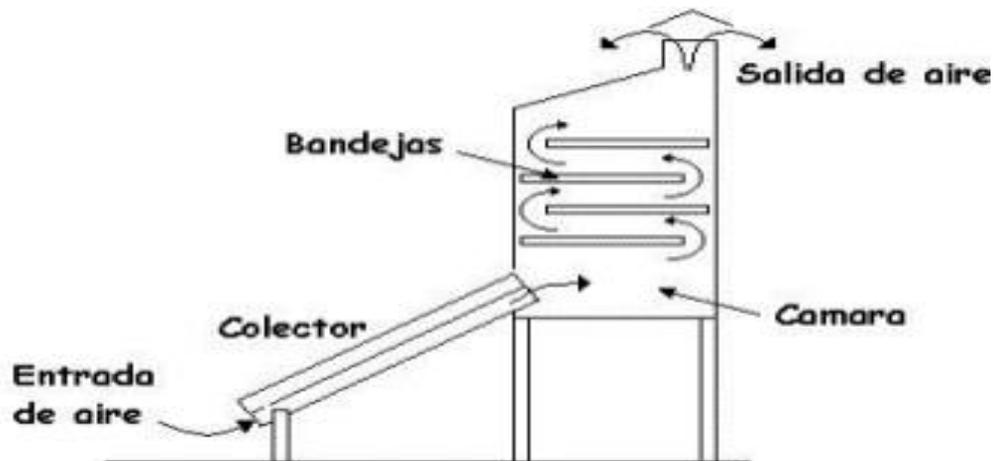


Figura 5. Deshidratador solar indirecto.

Fuente: Tomado de: “*Diseño y construcción de un deshidratador de plátano mediante el aprovechamiento de energía solar pasiva para los laboratorios de la facultad ingeniería civil y mecánica*” (De la Vega Sanchez, 2017)

En estos sistemas, el producto obtenido es de mejor calidad, no hay daños en el producto por la radiación directa del sol, todo esto debido a que la cámara de secado está protegido con respecto a la radiación del sol.

En comparación con los sistemas directo, estos sistemas hacen que el producto no se exponga directamente a la radiación solar, un resultado favorable, reduce el descoloramiento y el acabado quebradizo del producto.

### 2.5.3. Deshidratador solar mixto

Estos sistemas cuentan con algunas características del directo y otras del indirecto, la radiación solar es recibida tanto en el colector solar previo a la cámara de secado como en la misma cámara de secado. Sus ventajas son que tiene un control de proceso más simple y facilita la manipulación del producto en labores de carga y descarga.

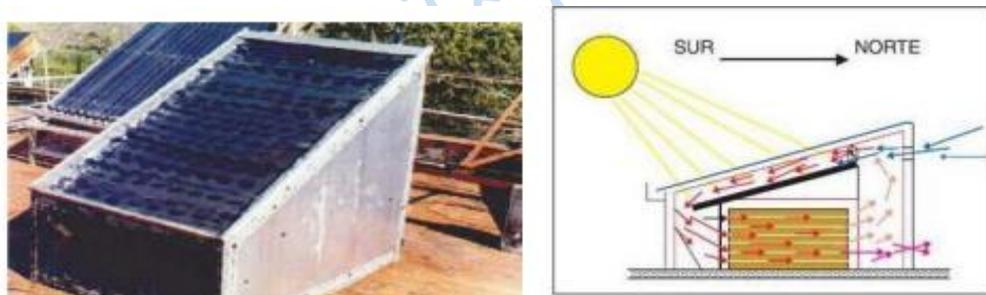


Figura 6. Deshidratador solar mixto.

Fuente: Tomado de: “*Diseño y construcción de un deshidratador de plátano mediante el aprovechamiento de energía solar pasiva para los laboratorios de la facultad ingeniería civil y mecánica*” (De la Vega Sanchez, 2017)

## 2.6. Radiación térmica

La radiación térmica es la energía electromagnética generada por el movimiento térmico de las partículas que hay en la materia, se extiende por medio del espacio a la velocidad de la luz. Para las aplicaciones de energía solar, solo la radiación térmica es importante. Los cuerpos desprenden radiación de tipo térmica debido a su temperatura que poseen; los átomos y moléculas, o los electrones presentan elevados estados de excitación y al retornar, de manera espontánea, a estados de menor movimiento emiten energía en manera de radiación electromagnética (Incropera & De Witt, 1999).

La radiación solar son ondas electromagnéticas emitidas radialmente a través del espacio de las cuales un porcentaje son absorbidas por la Tierra. Estas recorren aproximadamente 150 millones de kilómetros desde el Sol y la Tierra con un tiempo de demora de 8 minutos y 30 segundos (Guerrero Lemus, 2007).

El efecto que produce la radiación solar depende de la longitud de las ondas electromagnéticas. La radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja forman parte de la radiación solar denominada radiación térmica, debido a que es la parte del espectro electromagnético que toma más lugar en la transmisión de energía calorífica a través de la radiación. Una sustancia incrementa su nivel de energía debido a su ancho de banda de la radiación térmica (Incropera & De Witt, 1999).

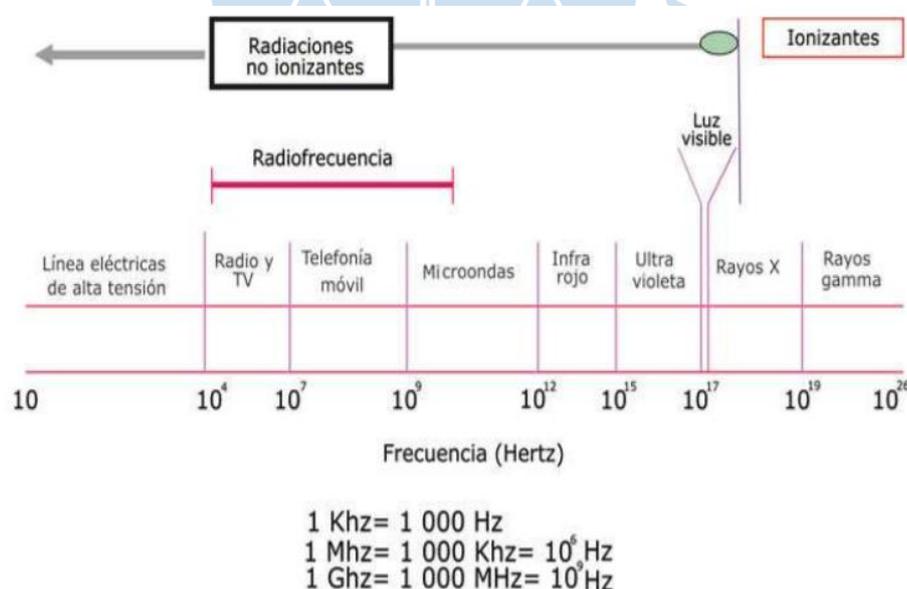


Figura 7. Espectro de la radiación electromagnético.

Fuente: Tomado de: “Radiaciones electromagnéticas y salud en la investigación médica” (Alejo & Leyva, 2010)

## 2.7. Conductividad térmica

Es una propiedad física de los materiales que proporciona el grado de capacidad que tiene una sustancia en transmitir energía de tipo cinética desde sus moléculas hacia otras que se encuentran cercanas o en contacto con ésta. La conductividad térmica se denota en el Sistema Internacional de Unidades como W/K. m, también es expresada en J/°C m s.

A los materiales que poseen alta conductividad térmica son denominados conductores y a los que son contrario a ello se les detallan como aislantes. Los metales a bajas temperaturas se hacen superconductores de la electricidad, sin embargo, no sucede lo mismo con el calor.

La conductividad térmica en los alimentos depende principalmente de su composición, además de su forma, tamaño, orientación, homogeneidad, etc. La definición de la conductividad térmica según la ley de Fourier de conducción de calor es la siguiente:

$$\dot{Q} = k * A * \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Donde:

$\dot{Q}$  es la razón de transferencia de calor expresada en unidades de W.

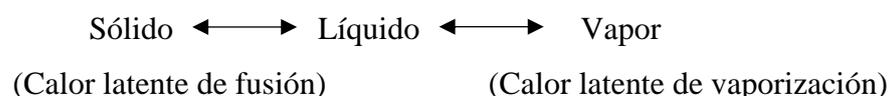
$dT/dx$  es la tasa de flujo de calor que atraviesa el área  $A$  en la dirección  $x$ .

$k$  es la constante de proporcionalidad conocida como conductividad térmica, es medida en W/m.K.

## 2.8. Calor latente

Durante algunos procesos de industria de alimentos, se presenta un cambio de fase además de cambios de energía. Las fases son sólidas, líquidas y gaseosas. El agua puede presentarse como sólido, líquido o vapor, además como una combinación de las tres fases en equilibrio. Se puede predecir en qué estado se encuentra el agua si se fija la presión y la temperatura, por tal motivo en la presentación del diagrama de fases esta fijados la presión y la temperatura (Postolski, 1986).

Para que se realice un cambio de fase se requiere de una cantidad de energía que es conocida como calor latente. Existen dos formas de este tipo de calor, los cuales son el calor latente de fusión y el calor latente de vaporización. El primero toma relevancia cuando se presenta un cambio de fase de sólido a líquido, en cambio, el calor latente de vaporización se lleva a cabo mediante el cambio de fase líquida a sólida.



En el caso del agua el valor del calor latente de fusión es de  $335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  y para el calor latente de vaporización es de  $2.257 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

## 2.9. Mecanismos de transferencia de calor

El calor es una de las formas de energía que se puede transferir de un cuerpo a otro, o para ser más exactos de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperaturas. La transferencia de calor se produce del medio que tiene la temperatura más alta a otro que posee menor temperatura, y dicha transferencia se va a detener cuando ambos cuerpos alcancen la misma temperatura. Existen tres modos diferentes para transferir el calor, los cuales son: conducción, convección y radiación.

### 2.9.1. Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. Este mecanismo puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases; en estos dos últimos aparece por los choques y difusión de las moléculas durante el movimiento desordenado que presentan. En sólidos se da por la unión de vibraciones moleculares en una retícula y al transporte de energía que viene dado por los electrones libres (Cengel, 2007).

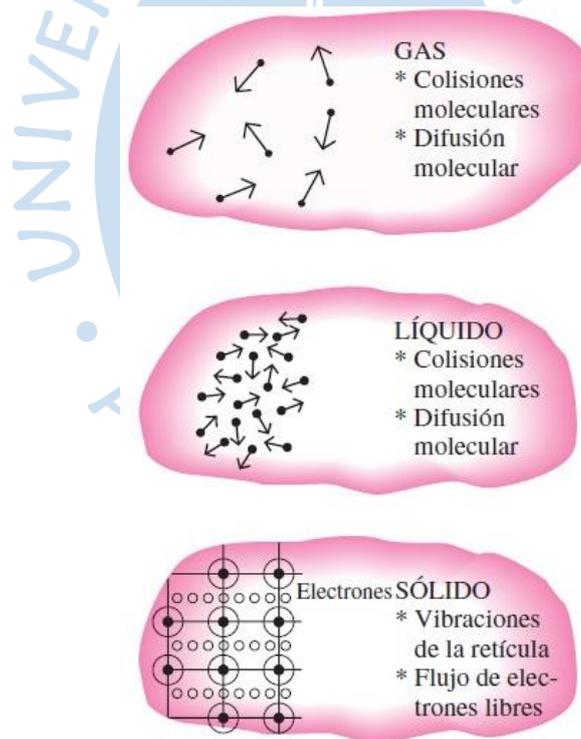


Figura 8. Mecanismos de conducción de calor en diferentes fases.

Fuente: Tomado de: “*Transferencia de calor y masa*” (Cengel, 2007)

La rapidez de conducción de calor depende de la geometría del medio, el material por el cual está compuesto y su espesor; así como la diferencia de temperatura a través de él. Esta se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{cond} = k * A * \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $T_1 - T_2$  la diferencia de temperatura a través de una placa y el delta de  $X$  el espesor de esta. El signo negativo garantiza que la transferencia de calor sea positiva en dirección positiva, pues el gradiente de temperatura como va de mayor a menor  $T$  hace negativa la ecuación.

### 2.9.2. Convección

Es la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de los fluidos; entre más rápido sea el movimiento, mayor es la transferencia de calor por convección; si no existe un movimiento masivo de fluido la transferencia de calor es por conducción pura (Cengel, 2007).

La convección se expresa convenientemente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q} = h * A_s * (T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección en las unidades de  $W/m^2$  o  $Btu/h.ft^2.^\circ F$ ;  $A_s$  es el área superficial donde se lleva a cabo la transferencia de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura del fluido y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie.

La función de la transferencia de calor tanto por convección y conducción en el rendimiento de un colector solar es de mucha importancia, debido a que por convección se generan pérdidas de energía entre el medio ambiente y el colector, mientras que la conducción se ve reflejada en la transferencia de calor que se da en los componentes internos del colector solar, principalmente en la superficie absorbadora. Además, la conducción se desarrolla en el fluido con el que trabaja el colector solar. La transferencia de calor por radiación térmica tiene un rol importante en el proceso de absorción de calor en los colectores solares (Incropera & De Witt, 1999).

El fenómeno de transferencia de calor por convección usualmente se clasifica de dos tipos: convección forzada y convección libre o natural.

Para el caso de la convección natural, el movimiento que tiene el fluido es la resultante de los gradientes que experimenta al ponerse en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (Sánchez, 2015).

En la convección forzada, el fluido circula por un sistema mediante la acción voluntaria de un agente externo, el cual puede ser un ventilador, una bomba, etc. (Sánchez, 2015).

### 2.9.2.1. Convección forzada

Los sistemas de secado solar se pueden clasificar como pasivos y activos, los pasivos con convección natural, es decir utilizan solamente la radiación solar y los activos con convección forzada, los cuales hacen que el aire caliente de secado circule por medio de un ventilador.

En este caso, los sistemas están diseñados para funcionar con ventiladores o bombas, los cuales mueven la energía solar en forma de aire caliente desde el colector hacia el interior del secador (Ching, Sachin, Sze, & Arun, 2012). En este tipo de disposiciones el flujo de aire depende de los diferenciales de presión generados por el ventilador. Además, no depende de las condiciones climáticas que se tengan en el exterior del secador debido a que se puede controlar a través del ventilador el flujo de aire. Sin embargo, una desventaja es que necesitan de una energía motriz para funcionar lo que eleva la demanda de energía y requieren de mantenimiento, por eso no son usados a pequeña escala (Speirs & Coote, 1986).

En los secadores de gabinete que utilizan convección forzada, el ventilador es ubicado en la parte inferior, donde se encuentra la entrada del flujo de aire.

En algunas aplicaciones, la energía eléctrica que requieren los ventiladores es suministrada por un panel solar fotovoltaico lo cual es factible y reduce costos.

### 2.9.3. Radiación

A diferencia de las dos formas anteriores de transferencia de calor, cuando se da por radiación no requiere de un medio que interceda, de hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida y no va a sufrir atenuación en vacío.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica (en K o R) es expresada por la Ley de Stefan – Boltzmann (Cengel, 2007) de la siguiente forma:

$$\dot{Q} = \sigma * A_s * T_s^4 \quad (2.4)$$

En donde  $\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/m^2.K^4$  y es referido a la constante de Stefan – Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima es denominada cuerpo negro, y se puede deducir que la superficie de todo cuerpo negro emite radiación si es que se encuentra a una temperatura diferente al cero absoluto y es independiente de las condiciones del medio (Sánchez, 2015).

Pero, un cuerpo real no va a satisfacer las características de un cuerpo negro pues no va a tener una emisividad igual a 1, dicha característica denota lo próximo que está un cuerpo real a un cuerpo negro y se encuentra en el intervalo de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Por lo tanto, la razón máxima de calor emitida sería para cualquier cuerpo:

$$Q_{emit} = \varepsilon * \sigma * A_s * T_s^4 \quad (2.5)$$

## **2.10. Propiedades térmicas de los alimentos**

Los componentes encontrados en los alimentos son: agua, grasa, proteína, fibra, carbohidratos y cenizas. Se puede encontrar tablas de los componentes a los que desarrollaron modelos matemáticos con el fin de determinar las propiedades térmicas de éstos en función de la temperatura en el rango de  $-40$  a  $149^\circ\text{C}$ , así mismo los hicieron para determinar las propiedades térmicas del agua y del hielo (Choi & Okos, 1986) (Umaña Cerros, pág. 39).

## **2.11. Parámetros presentes en el proceso de deshidratación**

### **2.11.1. Radiación**

Se encuentra presente en el proceso de deshidratación, cuando se emite radiación proveniente del Sol hacia el equipo. La energía de la radiación es aprovechada según los requisitos del proceso y producto al cual se le aplicara la deshidratación (García L. E., Mejía, Mejía, & Valencia, 2012).

### **2.11.2. Convección**

En el proceso de la deshidratación se encuentra presente la convección como método de transferencia de calor. Se encuentra en dos formas:

- Se transmite calor por convección desde la superficie captadora de calor proveniente de la radiación solar hacia el flujo de aire presente en el sistema.
- El aire caliente también se transmite calor por convección al producto a deshidratar en el interior del equipo (García L. E., Mejía, Mejía, & Valencia, 2012).

### **2.11.3. Conducción**

La conducción como método de transferencia de calor se encuentra presente en el proceso de deshidratación. Desde la superficie del producto a deshidratar se transfiere calor hasta su interior (García L. E., Mejía, Mejía, & Valencia, 2012).

### **2.11.4. Transferencia de masa**

Existe movimiento neto de masa desde el interior del producto a deshidratar hasta la superficie de éste. También se presente transferencia de masa desde la superficie del producto hacia el aire circundante (García L. E., Mejía, Mejía, & Valencia, 2012).

### **2.11.5. Calor latente**

El aire caliente existente en el deshidratador entra en contacto con los alimentos húmedos a través de su superficie, el calor transmitido se presenta como calor latente de evaporación, de esta forma el agua que está presente en los alimentos a deshidratar cambia de fase a estado de vapor (Cuarán Pantoja & Tinillo Córdova, 2013).

### **2.11.6. Presión parcial de vapor**

La presión parcial se presenta en los alimentos a deshidratar por el agua que estos contienen. Según la capacidad que tienen los alimentos de retener el agua, se clasifican en higroscópicos y no higroscópicos. Los primeros presentan presión parcial variable debido a su contenido de agua, por el otro lado en el caso de los segundos supresión parcial no varía (Cuarán Pantoja & Tinillo Córdova, 2013).

### **2.11.7. Capilaridad**

En el proceso de la deshidratación está presente la capilaridad que permite que el agua presente en los alimentos se escape de la superficie hacia la atmósfera circundante a través de los tubos capilares.

### **2.11.8. Difusión**

En la deshidratación de alimentos, la difusión se encuentra involucrada en este proceso, provocada por las diferencias en las concentraciones de solutos entre las distintas partes del alimento.

El agua también escapa de la superficie del alimento hacia la atmósfera por difusión del agua, que es absorbida en diversas capas sobre la superficie de los componentes sólidos del alimento.

Otro método por el cual el agua escapa de la superficie del alimento hacia la atmósfera es a través de difusión gaseosa, la cual es provocada por el gradiente de vapor presente en el interior del alimento.

### **2.11.9. Humedad crítica**

Es la humedad a la cual la velocidad de secado de un material comienza a disminuir a través del tiempo. Es uno de los principales parámetros que se debe determinar en los materiales a secar.

Este parámetro depende del tipo de material, además de la relación de secado cuando la velocidad de secado es constante en el tiempo (Cuarán Pantoja & Tinillo Córdova, 2013).

### **2.11.10. Humedad relativa**

En el proceso de la deshidratación, la humedad relativa del aire circundante aumenta cuando la velocidad del aire en el deshidratador es baja, además se reduce el gradiente de presión de vapor de tal forma que el proceso de la deshidratación se dificulta.

Así mismo, cuando la temperatura del aire disminuye o la humedad relativa aumenta, el proceso de la deshidratación se dificulta debido a que la velocidad de evaporación desciende.

El aire que entra a la cámara posteriormente sale por la chimenea en la parte superior del deshidratador con el fin de eliminar cierta parte del aire saturado, de este modo de busca mantener la humedad relativa alrededor del 60%.

La máxima temperatura que puede ser utilizada es de 71°C. En el caso de que la deshidratación inicie con una temperatura alta, se evapora muy rápido el agua de los tejidos superficiales, como resultado se obtienen productos de baja calidad debido a que se dificulta la salida del agua de los tejidos internos.

Las temperaturas altas y la baja humedad provocan la caramelización de los azúcares que se encuentran en las frutas (Cuarán Pantoja & Tinillo Córdoba, 2013).

### **2.11.11. Temperatura**

La temperatura es uno de los principales parámetros que interviene en el proceso de deshidratación, ya que la que permite la transferencia de calor. El rango de temperatura de trabajo ideal para el secado es de 38 a 71°C, asegurando la destrucción de las bacterias y la inactivación de las enzimas. Muchos estudios recomiendan que la temperatura debería ser de 43°C (World Health Organization; Pan American Health Organization, s.f.).

El exceso de calor impide un deshidratado completo. El producto cuando ya se encuentra seco debe dejarse enfriar para finalmente almacenarlo.

## Capítulo 3

### Diseño del deshidratador

#### 3.1. Tipo de deshidratador

Entre los distintos tipos de deshidratadores, en este proyecto se definió que se iba a utilizar el de tipo directo con convección forzada, es decir, que su fuente de alimentación proviene de la energía que genera la luz solar en el entorno además de un ventilador que suministra un flujo de aire en la entrada.

#### 3.2. Parámetros que influyen en el análisis del diseño del deshidratador

En la Tabla 1 se han organizado los parámetros que influyen en el análisis del diseño del deshidratador respecto a las condiciones climatológicas de la ciudad de Piura, el deshidratador, conductividad térmica, densidad, calores específicos y espesores de los materiales.

Tabla 1. Tabla de parámetros

| Parámetro   | Valor                   |
|---|-------------------------|
| <b>Condiciones climatológicas de la ciudad de Piura</b> |                         |
| Humedad relativa  | 74.49%                  |
| Presión barométrica                                     | 1 atm                   |
| Temperatura promedio                                    | 28.14°C                 |
| Radiación solar   | 673.95 W/m <sup>2</sup> |
| <b>Deshidratador</b>                                    |                         |
| Temperatura máxima en la cámara de proceso              | 50°C                    |
| Temperatura mínima en la cámara de proceso              | 30°C                    |
| Ancho útil de la cámara de proceso                      | 0.6 m                   |
| Largo útil de la cámara de proceso                      | 1 m                     |
| Alto útil de la cámara de proceso                       | 0.26 m                  |
| Número de bandejas                                      | 1                       |

|  |                        |
|--|------------------------|
| Capacidad de carga                             | 2 kg                   |
| Emisividad del vidrio ( $\epsilon$ )           | 0.9                    |
| Emisividad del acero inoxidable ( $\epsilon$ ) | 0.33                   |
| Absortividad del vidrio ( $\alpha$ )           | 0.05                   |
| Absortividad del acero inoxidable ( $\alpha$ ) | 0.3                    |
| <b>Conductividad térmica de materiales</b>     |                        |
| Fierro galvanizado                             | 46.5 W/m.°C            |
| Tecnopor (poliestireno)                        | 0.04 W/m.°C            |
| Madera   | 0.14 W/m.°C            |
| Vidrio   | 0.81 W/m.°C            |
| <b>Densidad de materiales</b>                  |                        |
| Densidad de fierro galvanizado                 | 7850 kg/m <sup>3</sup> |
| Densidad de tecnopor (poliestireno)            | 16 kg/m <sup>3</sup>   |
| Densidad de madera (pino)                      | 513 kg/m <sup>3</sup>  |
| Densidad de vidrio                             | 2800 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Calores específicos</b>                     |                        |
| $c_{P,Fierro\ galv}$                           | 0.45 kJ/kg.°C          |
| $c_{P,poliestireno}$                           | 1.2 kJ/kg.°C           |
| $c_{P,madera\ pino}$                           | 1.38 kJ/kg.°C          |
| $c_{P,vidrio}$                                 | 750 kJ/kg.°C           |
| <b>Espesores de materiales</b>                 |                        |
| Tecnopor                                       | 20 mm                  |
| Plancha de fierro galvanizado                  | 1.5 mm                 |
| Madera   | 10 mm                  |
| Vidrio   | 3 mm                   |

Fuente: Elaboración propia y agregados de (Cengel, 2007),  
(Estación metereológica en Universidad de Piura, s.f.)

### 3.2.1. Número de rodajas de banano

Para el cálculo de rodajas por bandeja se ha considerado una separación de 2.4 cm entre las rodajas, además de estimar un diámetro de 4 cm para cada una. Debido a esto se plantea distribuir las rodajas en 15 filas y 15 columnas (De la Vega Sanchez, 2017).

$$15 \times 15 = 225 \text{ rodajas}$$

$$A_r = 12.6 \text{ cm}^2$$

El número de rodajas equivale a unos 2.5 kg de banano aproximadamente. Con el dato del área de cada rodaja se procede a hallar el área delimitada por las rodajas en conjunto.

$$A_1 = A_r \times \#rodajas$$

$$A_1 = 12.6 \times 225 = 2835 \text{ cm}^2$$

Luego, para calcular el área total ocupada se estima que adicionando la separación entre ellas esta equivale a un 75%.

$$A_T = A_1 \times 75\% + A_1$$

$$A_T = 2835 \times 75\% + 2835 = 4961.25 \text{ cm}^2$$

Debido a que se usa una bandeja en la cámara, se comprobará si la cantidad de rodajas es el adecuado para esta. La cámara tiene medidas de 99 x 99 cm, por lo tanto, tiene un área de 9801 cm<sup>2</sup>, entonces dividiendo el área total entre la de la cámara se obtiene el número de bandejas a utilizar.

$$n^\circ \text{ de bandejas} = \frac{A_T}{A_{\text{cámara}}} = \frac{4961.25 \text{ cm}^2}{9801 \text{ cm}^2} = 0.506$$

Efectivamente, el número de rodajas es el adecuado para una sola bandeja. Esto también se puede observar en la Figura 9 donde se muestra una modelación de su distribución.

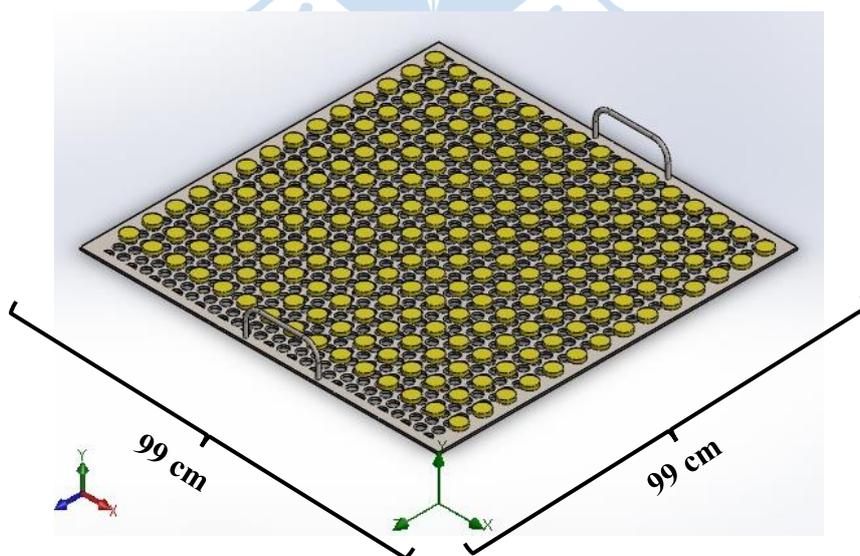


Figura 9. Distribución de las rodajas de banano en la bandeja

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. Características del producto a secar

#### 3.3.1. Generalidades del banano orgánico

El banano orgánico es un fruto o producto de necesidad básica, debido a su alto contenido de nutrientes, como potasio, calcio, zinc, etc. Es un fruto de alta demanda ya que en su proceso productivo no se usan químicos que afecten la salud del consumidor. En la región Piura, alrededor del 80% de exportación proviene del valle de Chira, ubicado en la provincia de Sullana, donde se producen los bananos pertenecientes a la familia de las Musáceas, al género *Musa* y que está dentro del subgrupo de Cavendish (AAA) (Torres, 2012).

En este estudio, para la fabricación del deshidratador solar se ha considerado como factores importantes: el porcentaje de humedad del fruto, la temperatura óptima a la que debe estar sometido, la geometría de corte, el grado Brix, estado de madurez, entre otros. De acuerdo con estos datos, se podrá obtener el tiempo de secado y la curva de secado del fruto escogido para su deshidratación. Los parámetros antes mencionados, se irán explicando a lo largo del proceso de deshidratación del banano.

A continuación, en las Tablas 2 y 3 se presentan algunos datos a tomar en cuenta de las propiedades del banano para su proceso de deshidratación a condiciones generales.

Tabla 2. Propiedades de deshidratación del banano

| <b>Propiedades Generales de Deshidratación</b> |                                 |   |                         |                        |                      |
|--|---------------------------------|---|-------------------------|------------------------|----------------------|
| Producto                                       | Calor específico<br>[kJ/kg. °C] | Temperatura<br>Máxima Tolerable<br>[°C] | Tiempo de<br>secado [h] | Humedad<br>Inicial (%) | Humedad<br>Final (%) |
| Banano   | 3.35                            | 70                                      | 6                       | 74.8                   | 10                   |

Fuente: Tomado y adaptado de (Blanco Cano & Valldecabres Sanmartín, 2016)

Tabla 3. Propiedades termodinámicas del banano.

| <b>Banano</b>         |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Densidad              | 980 kg/m <sup>3</sup> |
| Conductividad térmica | 0.481 W/m. °C         |

Fuente: Tomado de (Cengel, 2007)

### 3.3.2. Proceso de deshidratación

Se deben seguir los siguientes pasos para obtener la máxima calidad del proceso:

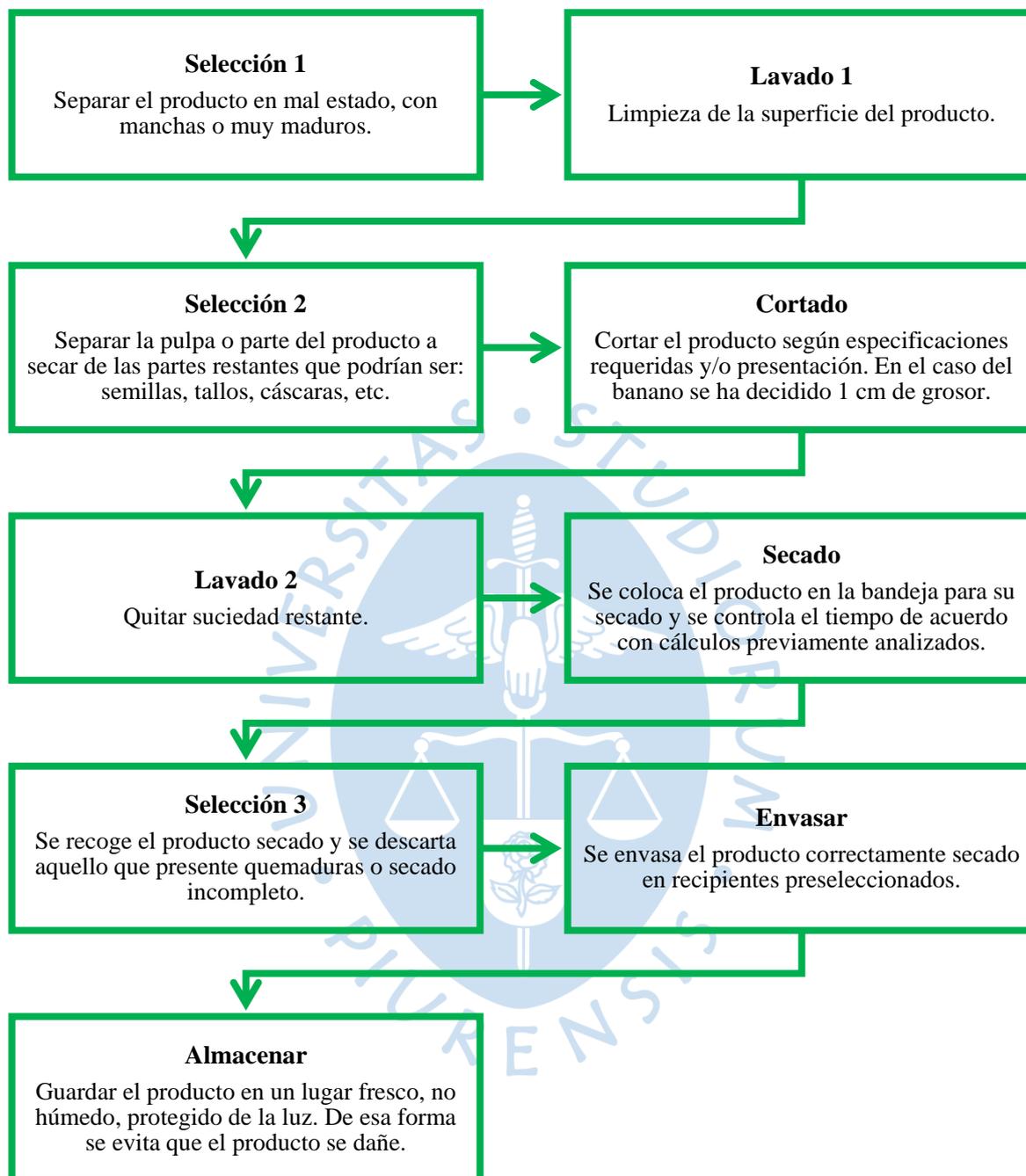


Figura 10. Pasos para realización del proceso de deshidratación.

Fuente: Elaborado a partir de (Almada, Cáceres, Machaín-Singer, & Claude Pulfer, 2005).

#### 3.3.2.1. Selección

Se empieza seleccionando el banano en mejor grado de madurez, los grados vienen dados del 1 al 8, cada uno con diferentes propiedades fisicoquímicas que serán presentadas en la Tabla 4. De acuerdo, con ciertas investigaciones es mejor deshidratar un banano amarillo con algunas

manchas marrones, este estado vendría a ser el 3 o 4 pues es semidulce por su sabor, porcentaje de pulpa, pH, humedad y mayor resistencia a la deshidratación.

Tabla 4. Grados de madurez del banano

| Propiedades                    | Grado de Madurez |           |       |
|--------------------------------|------------------|-----------|-------|
|                                | 2                | 4         | 6     |
| Longitud (cm.)                 | 14               | 15        | 16    |
| Peso Fresco (g.)               | 200              | 144       | 180   |
| Corteza (%)                    | 55               | 45        | 47    |
| Pulpa (%)                      | 45               | 55        | 59    |
| Acidez Total (Ác. Maleico) (%) | 0.54             | 0.67      | 0.62  |
| pH                             | 5.122            | 4.825     | 4.78  |
| Humedad (%)                    | 72.32            | 73.10     | 73.61 |
| Sólidos Solubles (°Brix)       | 9                | 14        | 16    |
| Sabor                          | Amargo           | Semidulce | Dulce |

Fuente: Tomado de (Caicedo, 2008)

### 3.3.2.2. Lavado y pelado

En esta etapa el banano es lavado para remover impurezas de su superficie, una vez terminado se procede a retirar la cáscara que lo envuelve.

### 3.3.2.3. Cortado

El banano orgánico, para deshidratarse tiene que pasar por un proceso de corte, es por ello, que se define su geometría tanto en forma como grosor y diámetro. De acuerdo con las referencias bibliográficas (Blanco Cano & Valdecabres Sanmartín, 2016) (Cornejo, Lopez, Ríos, Montalván, & Roa, 2019) (Vilcarima, 2015), el banano se puede cortar en rodajas no mayores a 1 cm de grosor, en forma de cilindro partiendo desde su centro, o solo removiendo la película o “primera capa” que recubre al banano por debajo de la cáscara. En este caso, se utilizará la primera geometría, porque tan solo con realizar el corte en rodajas ya se pierde humedad ayudando así, que el camino que recorre el agua del interior hacia las caras de la rodaja o paredes sea más corto, de este modo el tiempo de secado será más rápido. Esta opción viene a ser la más eficiente, ya que se optimiza la superficie de secado frente al volumen del banano.

### 3.3.2.4. Pre-tratamiento

Consiste en sumergir las rodajas de banano en una sustancia que ayude a preservar el alimento durante este proceso, ya que si no se realiza este no solo cambia en cuanto a apariencia

(tornado a marrón oscuro) sino también, en cuanto a sabor. Es por ello, que es sometido a una solución de metabisulfito o jugo de limón.

### **3.3.2.5. Secado**

El banano es colocado en las mallas (capacidad o masa depende del diseño del deshidratador), es sometido a una temperatura máxima que va entre los 65°-70°, siendo esta última la máxima tolerable del fruto. Para esta etapa se define más parámetros que intervendrán en el secado, como la velocidad de flujo de aire, que no debe sobrepasar los 5 m/s ya que si fuera así terminaría por quemar la superficie de la fruta, afectando de esta manera su calidad. El tiempo de secado por algunos datos teóricos, será entre 2-5 días, pero en realidad depende del corte que se le ha dado al fruto y las condiciones a las que está expuesto.

## **3.4. Material y equipo experimental**

### **3.4.1. Madera**

Es un material para la construcción del deshidratador solar, por su capacidad de aislar el sistema y no permitir pérdidas de calor, además es más fácil de conseguir (Blanco Cano & Valldecabres Sanmartín, 2016). También debe garantizar robustez, durabilidad y estanqueidad. La utilización de madera perjudicará al proceso de secado porque pueden absorber y emitir humedad, por eso, previamente debe ser barnizada o pintada sin importar el color de la pintura porque está no afecta al proceso de secado.

Es importante resaltar que para la carcasa también se puede utilizar metal, pero este deberá ser aislado con fibras, plástico, madera o pintar de negro, resaltando que pintar de negro el rendimiento es bajo.

### **3.4.2. Vidrio**

La parte superior o techo del deshidratador solar debe ser transparente para permitir el paso de la energía solar con la menor pérdida de ondas de luz solar (Salas Garita, Moya Rogue, & Cordoba Foglia, 2008). La energía solar actúa por medio de una onda corta para atravesar el vidrio y, una vez dentro de la cámara, queda atrapada debido a que se refleja en forma de onda larga produciendo un efecto invernadero.

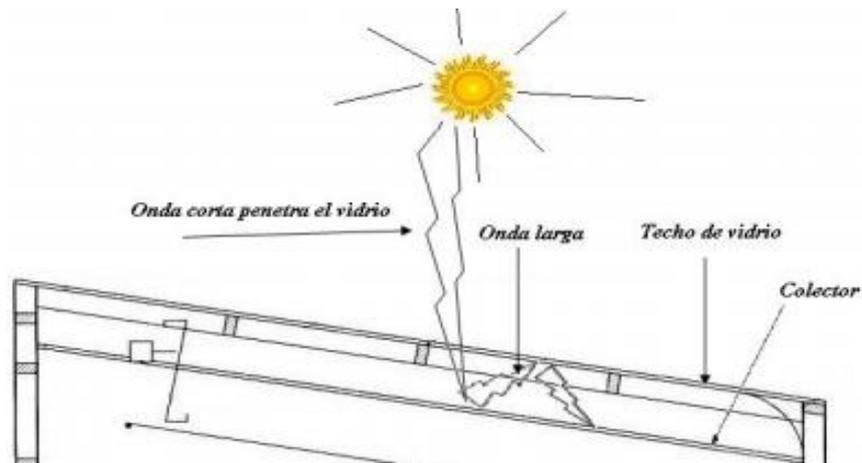


Figura 11. Efecto invernadero ocasionado por los rayos solares que atraviesan el vidrio.

Fuente: Diseño y construcción de un secador solar para madera (Salas Garita, Moya Rogue, & Cordoba Foglia, 2008)

### 3.4.3. Hierro galvanizado

Cumplirá la función de ser la placa absorbente, puesto que los puntos principales para su elección son la absorción y reflectividad, en este caso, se muestra que este material tiene una baja reflectividad o una mayor absorción con respecto a otros materiales en diferentes ángulos de incidencia del sol. Otro punto importante, es que posea alta conductividad térmica, y desde ese punto de vista los metales son la mejor opción (Madriz Vargas & Nandwani, 2011).

Menciona que esta placa absorbente es la pieza más importante y puede ser de acero, aluminio o plástico. Usar un colector de metal, siempre es preferible pintarlo de negro, aunque es muy recomendable usar pintura selectiva de baja emisividad porque reducirán las pérdidas por radiación menciona que para mejores rendimientos se sugiere una lámina de hierro de 3 a 4 mm. de espesor pintada en color negro mate (Bayer) (Blanco Cano & Valdecabres Sanmartín, 2016) (Salas Garita, Moya Rogue, & Cordoba Foglia, 2008).

### 3.4.4. Poliestireno expandido

El poliestireno expandido o también conocido como tecnopor será utilizado como aislante térmico en las paredes del deshidratador debido a que tiene bajo coeficiente de conductividad térmica de  $0.040 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  (Cengel, 2007). Es necesario el uso de este material en el deshidratador debido a que se necesita concentrar el calor en el interior y evitar pérdidas de calor a través de la conducción en sus paredes. Además, como cualidades secundarias se puede destacar que es un material de protección contra impactos, es ligero y de fácil conformado, por ende, se puede adaptar muy bien al diseño del deshidratador.

### 3.5. Diseño de deshidratador

Para el diseño se tomaron en cuenta ciertas consideraciones como la cantidad de materia a deshidratar y el ángulo de inclinación de superficie captadora.

La superficie captadora debe tener un ángulo de inclinación de  $15^\circ$  aproximadamente, ya que el deshidratador debe ser usado todo el año para la cual se requiere que tenga una variación de  $10^\circ$  de la latitud del lugar (CENSOLAR, 2007).

$$\text{Ángulo de inclinación} = \text{Latitud del lugar} + 10^\circ \quad (3.1)$$

Según la página web de la estación meteorológica de la Universidad de Piura, la latitud en la ciudad de Piura es de  $5^\circ 10' 14''$ , obteniendo como resultado un ángulo de inclinación de  $15^\circ$  aproximadamente. El valor de latitud se encuentra en el Anexo A: Datos de estación meteorológica en Universidad de Piura.

$$\text{Ángulo de inclinación} = 5^\circ 10' 14'' + 10^\circ = 15^\circ$$

A continuación, se presenta el diseño del deshidratador en la Figura 12.

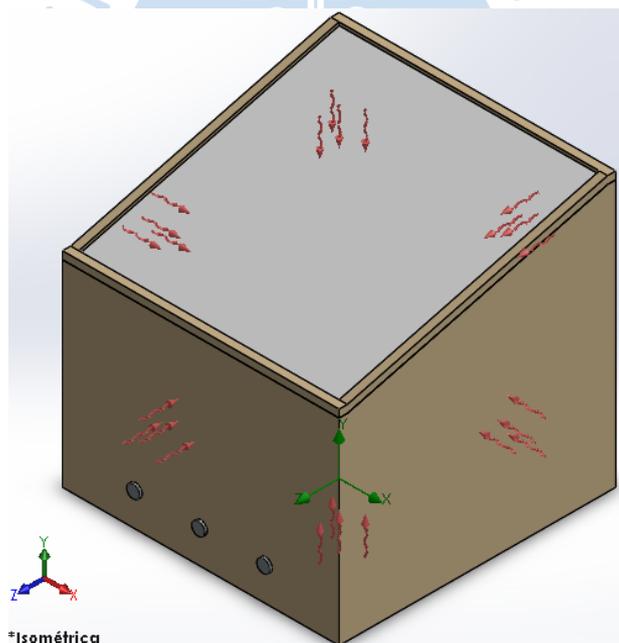


Figura 12. Vista isométrica del deshidratador

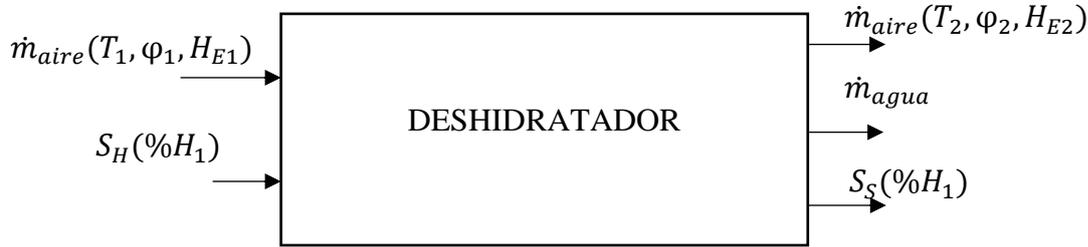
Fuente: Elaboración propia

### 3.6. Balance de materia

El análisis para este cálculo es basado con respecto al análisis de (Gallego Yanza, 2006). Entonces, se sabe que el principio de conservación de masa para un volumen de control se expresa de la siguiente manera:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Tasa de masa total} \\ \text{entrante al VC} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Tasa de masa total} \\ \text{saliente del VC} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Tasa de cambio neto} \\ \text{de masa} \\ \text{dentro del VC} \end{array} \right]$$

$$\sum \dot{m}_{\text{entrada}} - \sum \dot{m}_{\text{salida}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistema}} \quad (3.2)$$



$$\dot{m}_{\text{agua}} = \text{Agua que entra} - \text{Agua que sale} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{S_H * H_{\text{Inicial}}}{100} - \frac{S_S * H_{\text{Final}}}{100} \quad (3.4)$$

Donde:

$H_{\text{Inicial}}$ : humedad inicial [%]

$H_{\text{Final}}$ : humedad final [%]

$S_H$ : flujo másico humedo [kg/s]

$S_S$ : flujo másico seco [kg/s]

La humedad inicial se obtuvo del promedio del año 2019, de un conjunto de datos proporcionados desde la página web del SENAMHI (Anexo C: Datos SENAMHI).

$$S_H - S_S = \dot{m}_{\text{agua}} \rightarrow S_S = S_H - \dot{m}_{\text{agua}} \quad (3.5)$$

Al despejar  $S_S$  y reemplazar (3.5) en (3.4):

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{S_H H_{\text{Inicial}}}{100} - \frac{(S_H - \dot{m}_{\text{agua}}) H_{\text{Final}}}{100}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{S_H H_{\text{Inicial}}}{100} - \frac{S_H H_{\text{Final}}}{100} + \frac{\dot{m}_{\text{agua}} H_{\text{Final}}}{100}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} \left( 1 - \frac{H_{\text{Final}}}{100} \right) = \frac{S_H H_{\text{Inicial}} - S_H H_{\text{Final}}}{100}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = S_H * \frac{H_{\text{Inicial}} - H_{\text{Final}}}{100 - H_{\text{Final}}} \quad (3.6)$$

Siendo  $S_H = \text{masa total} / \text{tiempo de exposición}$ , se asume un tiempo de exposición mínimo de 6 horas (Tabla 2) y considerando una carga de 2.5 kg de banano, se obtiene que  $S_H = 0.4177 \text{ kg/h}$ .

Reemplazando los datos:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 0.4177 * \frac{74.8 - 10}{100 - 10} = 0.3 \text{ kg/h}$$

Reemplazando  $\dot{m}_{agua}$  en la ecuación (3.4), se tiene:

$$S_5 = 0.4177 - 0.3 = 0.1167 \text{ kg/h}$$

Para calcular el agua arrastrado por el aire seco, se usa:

$$\text{Agua arrastrada por el aire seco} = H_{E2} - H_{E1}$$

Donde:

$H_{E2}$ : humedad específica del aire a la salida.

$H_{E1}$ : humedad específica del aire a la entrada.

Las humedades específicas se pueden calcular de la siguiente manera:

$$H_E = \frac{0.622 * P_V}{P_{ATM} - P_V} \quad (3.7)$$

$$H_R = 100 * \frac{P_V}{P_{SAT}} \quad (3.8)$$

Despejando  $P_V$  de (3.7), y sustituyendo en (3.6) se obtiene:

$$H_E = \frac{0.622 * H_R * P_{SAT}/100}{P_{ATM} - H_R * P_{SAT}/100}$$

De manera que:

$$H_E = \frac{0.622(H_R * P_{SAT})}{100 * P_{ATM} - (H_R * P_{SAT})} \quad (3.9)$$

Para poder calcular  $H_{E1}$  y  $H_{E2}$ , se tiene los siguientes datos:

- $P_{atm} = 1 \text{ bar} = 101.325 \text{ kPa}$
- Para la entrada y salida se tiene:

$$H_{R1} = 74.49\% \text{ y } P_{sat \text{ a } 25.8^\circ\text{C}} = 3.32 \text{ kPa}^1$$

$$H_{R2} = 74.49 - 10 = 64.49\% \text{ y } P_{sat \text{ a } 50^\circ\text{C}} = 12.352 \text{ kPa}$$

Donde:

$H_{R1}$ : humedad relativa en la entrada

$H_{R2}$ : humedad relativa en la salida

La  $P_{sat \text{ a } 28.14^\circ\text{C}}$ , es la presión de saturación en la entrada a una temperatura promedio de 28.14 °C, la temperatura promedio se obtuvo de los datos del año 2019 obtenidos desde la página web del SENAMHI (Anexo C: Datos SENAMHI).

Obteniendo los siguientes resultados:

$$H_{E1} = \frac{0.622(74.49 * 3.320)}{100 * 101.325 - (74.49 * 3.320)} = 0.01556 \text{ kg de vapor/kg aire seco}$$

<sup>1</sup> Valores de  $P_{sat \text{ a } 28.14^\circ\text{C}}$  y  $P_{sat \text{ a } 50^\circ\text{C}}$  obtenidos de (Cengel, 2007)

$$H_{E2} = \frac{0.622(64.49 * 12352)}{100 * 101325 - (64.49 * 12352)} = 0.05307 \text{ kg de vapor/kg aire seco}$$

Sabiendo que la humedad específica es la cantidad de vapor de agua contenido en una determinada cantidad de aire, se tiene que:

$$H_{E2} - H_{E1} = \frac{\dot{m}_{agua}}{\dot{m}_{aire}} \quad (3.10)$$

Entonces:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{0.3}{0.05307 - 0.01556} = 7.997 \text{ kg/h}$$

Se sabe que el flujo másico que pasa por una sección transversal es:

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad (3.11)$$

Donde:

$$\dot{V}_{\text{aire seco}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire seco}}} \quad (3.12)$$

$$\dot{V}_{\text{aire húmedo}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire húmedo}}}{\rho_{\text{aire húmedo}}} \quad (3.13)$$

Para calcular la densidad del aire seco se usará la carta psicrométrica (Anexo B), con la temperatura de 28.14 °C y la humedad relativa de 74.49, teniendo:

$$\rho_{\text{aire seco}} = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

Para el cálculo de la densidad de aire húmedo, se usa la siguiente fórmula en función de la temperatura (Tiwari, 2002).

$$\rho_{\text{aire húmedo}} = 1.1774 - 0.00359(T_f - 27) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]; T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{aire húmedo}} = 1.095 \text{ kg/m}^3$$

Obteniendo:

$$\dot{V}_{\text{aire seco}} = \frac{7.997}{1.17} = 6.8358 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para  $\dot{V}_{\text{aire húmedo}}$  se tiene que:

$$\dot{m}_{\text{aire húmedo}} = \dot{m}_{\text{aire}} H_{E2} \quad (3.14)$$

$$H_{E2} = 0.05307 \text{ kg de vapor/kg aire seco}$$

$$\dot{m}_{\text{aire húmedo}} = 6.3983 * 0.05307 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{aire húmedo}} = 0.3396 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_{\text{aire húmedo}} = \frac{0.4177}{1.095} = 0.3866 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con los datos obtenidos se puede calcular al caudal de aire requerido, con la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{requerido} = \frac{\dot{m}_{agua} + \dot{m}_{aire\ húmedo}}{\rho_{aire\ húmedo}} \quad (3.15)$$

$$\dot{V}_{requerido} = \frac{0.3 + 0.4244}{1.095} = 0.6615 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.3494 \text{ CFM}$$

$$\dot{V}_{requerido} = 0.6615 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 1.8375 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = V.A$$

Donde:

V: velocidad del viento [m/s]

A: Área de sección de entrada de aire [m<sup>2</sup>]

$$A = 0.0425 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{\dot{V}_{requerido}}{A} = \frac{1.8472 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0.0425 \text{ m}^2} = 4.3235 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

La velocidad de viento en la ciudad de Piura es de 1.2155 m/s. Debido a que se requiere una velocidad de aire de 4.3235x10<sup>-3</sup> m/s no es necesario el uso de ventilador ya que la velocidad de aire satisface los requerimientos. Incluso si se supone que a la altura del suelo se tiene 0.5 m/s de velocidad del aire se cumple con lo requerido (Estación metereológica en Universidad de Piura, s.f.).

### 3.7. Potencia requerida para deshidratar banano

El banano para deshidratar necesitará cierta cantidad de flujo calorífico para poder cumplir el proceso de deshidratación.

Datos:

Tabla 5. Tabla resumen de valores

| Parámetro                                    | Valor             |
|--|-------------------|
| Masa para deshidratar ( <i>m</i> )           | 2.5 kg            |
| Temperatura final ( <i>T<sub>f</sub></i> )   | 50 °C             |
| Temperatura inicial ( <i>T<sub>i</sub></i> ) | 28.14°C = 301.29K |

Fuente: Elaboración propia

Se calcula el calor requerido para poder deshidratar el banano:

$$Q = m * (\%ext) * c_p * \Delta T \quad (3.16)$$

$$Q = m * (\%ext) * c_p * (T_f - T_i) \quad (3.17)$$

Se calcula la diferencia de humedad extraída del banano con los datos de la Tabla 2:

$$\%ext = Humedad\ inicial - Humedad\ final \quad (3.18)$$

$$\%ext = 74.8\% - 10\% = 64.8\%$$

Se reemplaza en la fórmula de calor:

$$Q = 2.5 * 0.648 * 3.35 * (50 - 28.14)$$

$$Q = 118.63 \text{ kJ}$$

Se requiere 105.0667kJ de calor para deshidratar el banano.

Potencia requerida para deshidratar:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\text{Tiempo}} \quad (3.19)$$

$$\text{Tiempo} = 6 \text{ horas} = 6 \text{ h} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 21600 \text{ s}$$

Se reemplazan los datos:

$$\dot{Q} = \frac{118.63 \text{ kJ}}{21600 \text{ s}} = 5.49 \text{ W}$$

Se considera una temperatura promedio de 28.14°C, presión de 1 atm, humedad relativa de 74.49% para poder hallar con la ayuda de la carta psicrométrica (Psicrometría) y tabla A-15 (Cengel, 2007) los siguientes datos del aire:

Tabla 6. Resumen de datos de propiedades del aire a 28.14°C

| Parámetro                                    | Valor   |
|--|---|
| Viscosidad dinámica                          | $1.8634 * 10^{-5} \text{ kg/m.s}$             |
| Viscosidad cinemática                        | $1.591 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$        |
| Difusividad térmica                          | $2.1831 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$     |
| Calor específico ( $c_p$ )                   | $1.007 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$          |
| Conductividad térmica (k)                    | $0.0257 \text{ W/m.K}$                        |
| Densidad                                     | $1.1714 \text{ kg/m}^3$                       |
| Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ )       | $28.14 \text{ }^\circ\text{C}$                |
| Temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ )     | $22.34 \text{ }^\circ\text{C}$                |
| Entalpia específica (h)                      | $65.79 \text{ kJ/kg}$                         |
| Humedad específica a la entrada ( $H_{E1}$ ) | $0.01556 \text{ kg de vapor/kg de aire seco}$ |

Fuente: Datos obtenidos de carta psicrométrica (Psicrometría) y tabla A-15 (Cengel, 2007)

### 3.8. Resistencias térmicas

#### 3.8.1. Radiación solar

El entorno exterior (ambiente) emite constantemente energía solar que es aprovechada el sistema planteado. Antes que esta energía se aproveche directamente en el colector, pasa como

primer contacto por el vidrio, el cual posee de su propia resistividad conductiva. El flujo de calor entrante al sistema se representa de la siguiente forma:

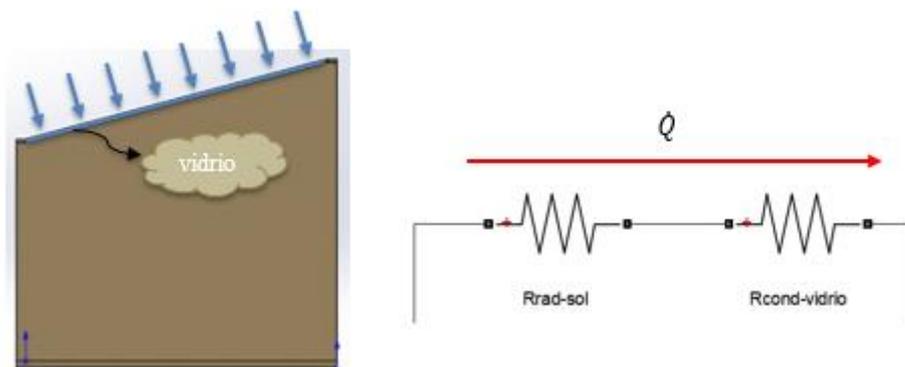


Figura 13. Resistencias térmicas por radiación solar.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2. Convección forzada

El deshidratador contará con un ventilador que introduzca aire del exterior para que así el flujo de aire caliente en el interior se distribuya mejor consiguiendo reducir el tiempo de secado lo que causaría una mayor eficiencia del sistema. Este mecanismo de transferencia de calor es el más influyente en el deshidratador debido a que gracias a este es que el banano podrá deshidratarse.

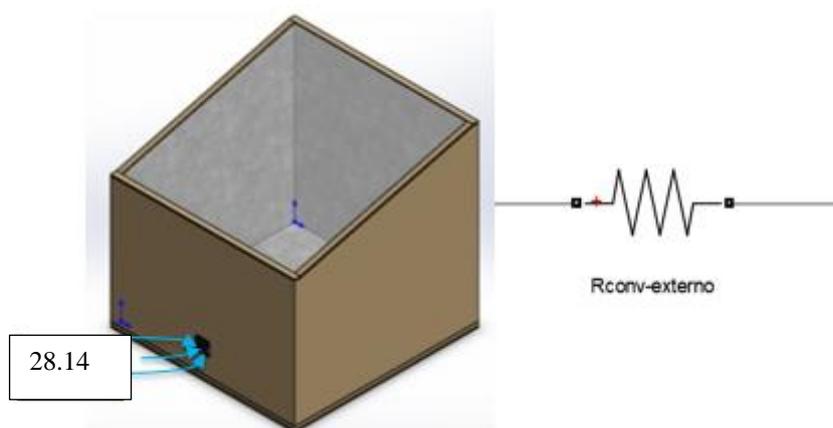


Figura 14. Resistencias térmicas por convección

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la energía en forma de calor que se obtiene dentro del sistema de deshidratación viene dada por las dos formas de transferencias anteriormente explicados. Dicho flujo de calor se va a distribuir por los diferentes materiales presentes en el deshidratador, para los cuales se ha procedido a tratarlos como interfaces paralelas, con la finalidad de poder distribuirlos en una red de resistencias en paralelo, la cual sería la siguiente.

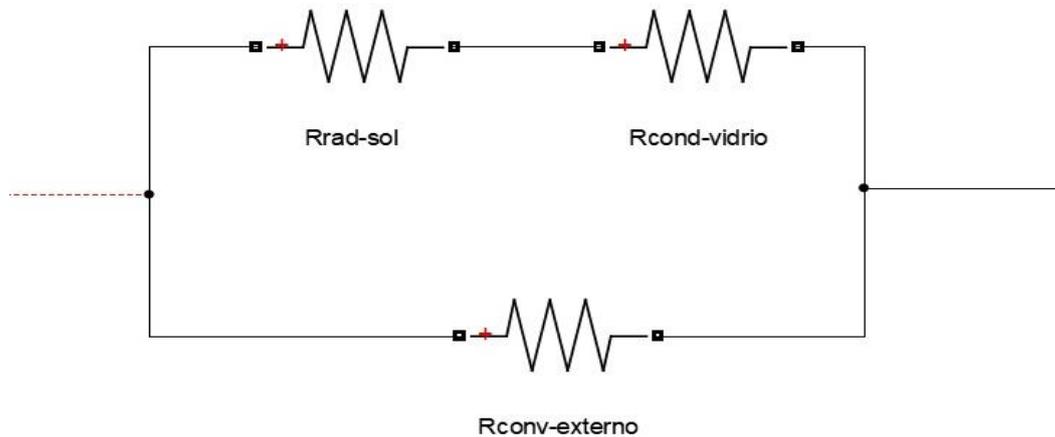


Figura 15. Resistencias térmicas por convección forzada

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.3. Transmisión de calor en el interior del deshidratador

En el interior del deshidratador el calor se transmite por medio de la convección del aire y la radiación de la placa en el interior. Este sistema se plantea como dos resistencias en paralelo, conformado por una resistencia de convección del aire en el interior del deshidratador y la otra resistencia de radiación de la placa de hierro galvanizado.

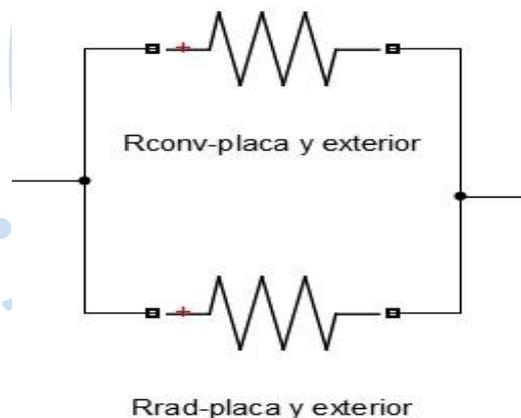


Figura 16. Sistema de transferencia de calor en el interior del deshidratador.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.4. Flujo de calor por medio de tres paredes

Cuando se tiene dos sistemas de distintas temperaturas ocurre el fenómeno de transferencia de calor que se aprecia principalmente en los materiales conductores. Sin embargo, en los materiales aislantes también ocurre, pero de una forma menos eficiente, lenta y esto es debido a las propiedades de cada material (capacidad para conducir energía, calor).

El deshidratador planteado consta de una pared aislante de tres capas: acero galvanizado, corcho y madera como cobertura externa, las cuales se pueden representar como un circuito de

resistencias en serie. El calor se absorberá de manera conductiva, es decir, que en principio la plancha de hierro galvanizado será quien reciba el calor, transmitiendo el calor a través del corcho (poliestireno) y luego se trasladará también a la de madera.

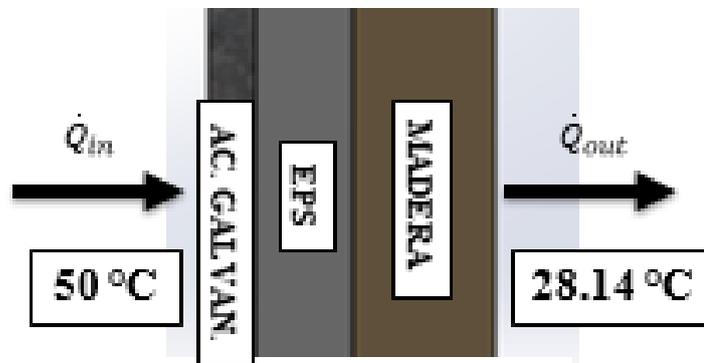


Figura 17. Sistema de transferencia de calor.

Fuente: Elaboración propia.

Como circuito resulta:

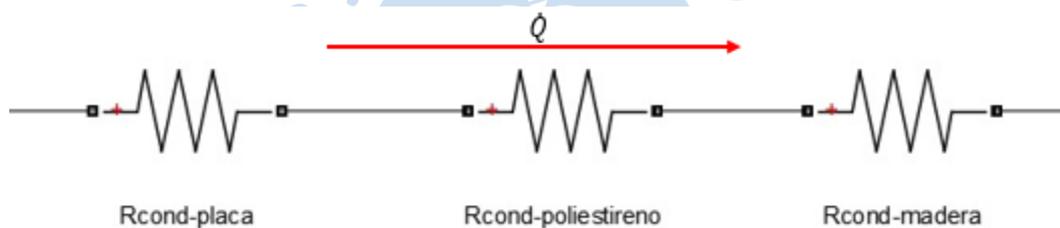


Figura 18. Resistencias por conducción.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.5. Distribución de resistencias internas del sistema

El calor que se obtiene de la energía solar y el de convección por introducción de aire externo se repartirá en todos los componentes internos del colector como son: paredes, placa y el mismo aire que conseguirá calentarse. Es así como obtener un esquema de resistencias en paralelo, pues el calor en general se distribuirá.

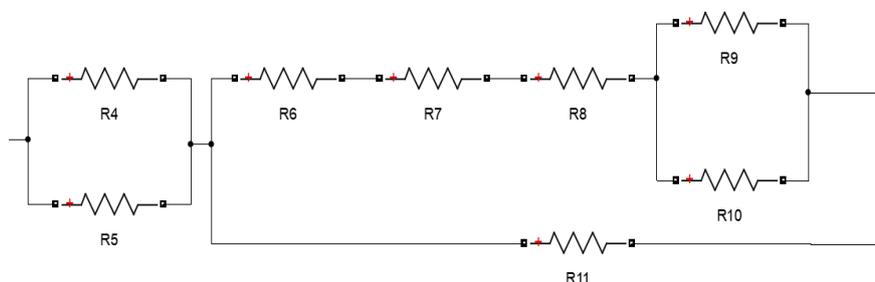


Figura 19. Distribución de resistencias térmicas.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.6. Sistema de distribución de resistencias final del sistema

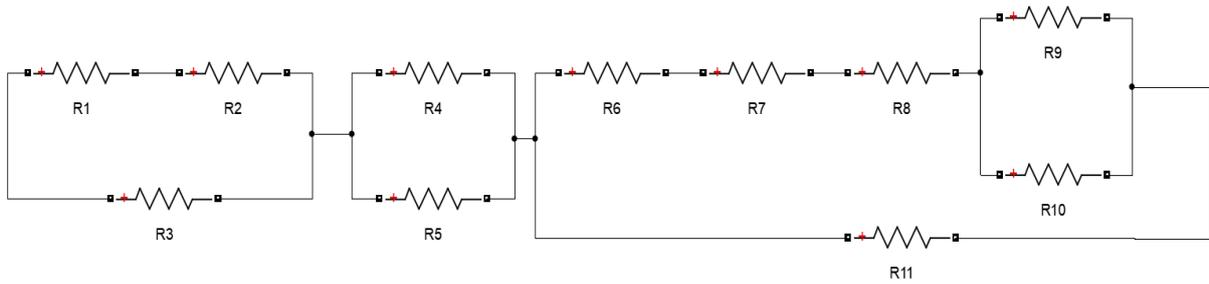


Figura 20. Sistema de resistencias térmicas.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de toda la red de resistencias térmicas presentes en el deshidratador, se definen las siguientes ecuaciones.

$$R_{\text{rad,solar}} = \frac{1}{h_{\text{rad}} * A_{\text{vidrio}}} = R1 \quad (3.20)$$

$$R_{\text{cond,vidrio}} = \frac{L}{k_{\text{vidrio}} * A_s} = R2 \quad (3.21)$$

$$R_{\text{conv,ext}} = \frac{1}{h_{\text{conv-ext}} * A_s} = R3 \quad (3.22)$$

$$R_{\text{conv,int}} = \frac{1}{h_{\text{conv,int}} * A_s} = R4 \quad (3.23)$$

$$R_{\text{rad,placa int}} = \frac{1}{h_{\text{rad,placa}} * A_s} = R5 \quad (3.24)$$

$$R_{\text{cond,fe.galv}} = \frac{L}{k_{\text{acero}} * A_s} = R6 \quad (3.25)$$

$$R_{\text{cond,poliestireno}} = \frac{L}{k_{\text{corcho}} * A_s} = R7 \quad (3.26)$$

$$R_{\text{cond,madera}} = \frac{L}{k_{\text{madera}} * A_s} = R8 \quad (3.27)$$

$$R_{\text{rad,mad}} = \frac{1}{h_{\text{rad,mad}} * A_s} = R9 \quad (3.28)$$

$$R_{\text{conv,mad}} = \frac{1}{h_{\text{conv,mad}} * A_s} = R10 \quad (3.29)$$

$$R_{\text{conv,sal}} = \frac{1}{h_{\text{conv,sal}} * A_s} = R11 \quad (3.30)$$

En la primera malla de la red, se observa que tanto la resistencia térmica de radiación solar con la de conducción del vidrio están en serie, y estas a su vez en paralelo con la de convección del aire. Se procede a calcular una resistencia equivalente de la siguiente manera.

$$R_{eq1} = [(R_{rad,solar} + R_{cond,vidrio})^{-1} + (R_{conv,ext})^{-1}]^{-1} \quad (3.31)$$

En la segunda malla se va a tener que la resistencia térmica de convección interior va a estar en paralelo con la resistencia radiación de la placa de hierro galvanizado.

$$R_{eq2} = [(R_{rad,placa})^{-1} + (R_{conv,int})^{-1}]^{-1} \quad (3.32)$$

La tercera malla estará compuesta por dos sistemas en paralelo. El primer sistema estará integrado por tres resistencias de conducción en serie de la placa, poliestireno y madera, las cuales estarán en serie por dos resistencias en paralelo de convección de la placa con el exterior y radiación de la placa con el exterior. El segundo sistema estará compuesto por la resistencia de convección a la salida, que representa al aire caliente del interior sale del deshidratador.

$$R_{eq3} = \left\{ \left[ R_{cond,fe.galv} + R_{cond,poliestireno} + R_{cond,madera} + \left( (R_{conv,placa\ ext})^{-1} + (R_{rad,placa\ ext})^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} + R_{conv,sal\ ext}^{-1} \right\}^{-1} \quad (3.33)$$

Finalmente, se procede a calcular la resistencia final compuesta por las tres resistencias equivalentes planteadas anteriormente. Las tres resistencias equivalentes están en serie.

$$R_{tot} = R_{eq1} + R_{eq2} + R_{eq3} \quad (3.34)$$

### 3.8.6.1. Cálculo de resistencia térmica por radiación en el vidrio

La resistencia térmica de radiación sobre el vidrio se calcula de la siguiente manera:

$$R_{rad,solar} = \frac{1}{h_{rad} * A_{vidrio}} \quad (3.35)$$

El factor de radiación  $h_{rad}$  se obtiene de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$h_{rad} = \varepsilon_{vidrio} * \sigma * (T_1 + T_{cielo}) * (T_1^2 + T_{cielo}^2) \quad (3.36)$$

Datos:

Tabla 7. Resumen de datos de radiación en el vidrio

| Parámetro                        | Valor                                     |
|----------------------------------|---|
| $\varepsilon_{vidrio}$           | 0.9                                       |
| $\sigma$                         | $5.67 * 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$          |
| $T_1$                            | $28.14 \text{ }^\circ\text{C} = 301.29 K$ |
| Área del vidrio ( $A_{vidrio}$ ) | $1.0353 m^2$                              |

Fuente: Elaboración propia

La temperatura del cielo se calcula de la siguiente forma (Swinbank, 1963):

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 * T_a^{1.5} \quad (3.37)$$

Donde  $T_a$  es la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ). Se procede a reemplazar los datos:

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 * 28.14^{1.5} = 8.2399 \text{ }^{\circ}\text{C} = 281.39 \text{ K}$$

Se reemplazan los datos en la ecuación (3.35):

$$h_{\text{rad}} = 0.9 * 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 * (301.29\text{K} + 281.39\text{K}) * (301.29^2 + 281.39^2)$$

$$h_{\text{rad}} = 5.0535 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Se calcula la resistencia térmica de radiación:

$$R_{\text{rad},\text{solar}} = \frac{1}{5.0535 * 1.0353} = 0.1911 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### 3.8.6.2. Resistencia térmica por conducción en el vidrio

Se procede a calcular la resistencia térmica de conducción del vidrio; para lo cual se debe tener en cuenta el espesor de este, su área y el coeficiente de conducción; los cuales serían:

$$L = 3\text{mm} = 0.003 \text{ m}$$

$$A = 1.035 \text{ m}^2$$

$$k_{\text{vidrio}} = 0.81 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{K}$$

Se reemplazan en la fórmula de resistencia térmica por conducción:

$$R_{\text{cond-vidrio}} = \frac{L}{k_{\text{vidrio}} * A} \quad (3.38)$$

$$R_{\text{cond-vidrio}} = \frac{0.003}{0.81 * 1.0353} = 0.003578 \text{ K/W}$$

### 3.8.6.3. Resistencia térmica por convección del aire en el exterior del deshidratador

El coeficiente de convección se determina con la velocidad del aire en el exterior, que se obtuvo de los datos de la estación meteorológica de UDEP una velocidad promedio del aire de  $1.2155 \text{ m/s}$ .

Con la ecuación de (Mc Adam, 1954) se calcula el coeficiente de convección.

$$h_{\text{conv-ext}} = 5.7 + 3.8v \quad (3.39)$$

Donde:

$$h_{\text{conv-ext}} = \text{Coeficiente de convección externa}$$

$$v = \text{Velocidad del aire}$$

Se reemplazan la velocidad del aire en la fórmula anterior:

$$h_{\text{conv-ext}} = 5.7 + 3.8 * 1.2155 = 10.3189 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Se calcula la resistencia térmica con la ecuación (3.21):

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{h_{conv-ext} * A_s}$$

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{10.3189 * 1.3135} = 0.0738 \text{ K/W}$$

### 3.8.6.4. Resistencia térmica por convección del aire que ingresa al deshidratador

La Resistencia térmica de convección entre el exterior e interior se calcula de la siguiente manera:

$$R_{conv,int} = \frac{1}{h_{conv,int} * A_s} \quad (3.40)$$

El coeficiente de convección se obtiene de despejar  $h$  de la fórmula del Número de Nusselt (Cengel, 2007):

$$Nu = \frac{h * D}{k} \quad (3.41)$$

Se despeja y se obtiene:

$$h = \frac{k * Nu}{D}$$

Se calcula del Número de Rayleigh a través de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$Ra = \left( \frac{g * \beta * (T_{int} - T_{ext}) * D^3}{\nu^2} \right) * Pr \quad (3.42)$$

Se calcula temperatura promedio del interior y exterior del deshidratador:

$$T_{prom} = \frac{50 + 28.14}{2} = 39.07^\circ\text{C} = 312.22 \text{ K}$$

Datos:

Tabla 8. Resumen de datos

| Parámetro                          | Valor                                    |
|------------------------------------|--|
| Gravedad ( $g$ )                   | $9.81 \text{ m/s}^2$                     |
| Temperatura interior ( $T_{int}$ ) | $50^\circ\text{C} = 323.15 \text{ K}$    |
| Temperatura exterior ( $T_{ext}$ ) | $28.14^\circ\text{C} = 301.29 \text{ K}$ |
| $\beta = 1/T_{prom}$               | $3.2029 * 10^{-3} \text{ K}^{-1}$        |

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla A-15 (Cengel, 2007) a una temperatura de  $39.07^\circ\text{C}$ , se obtienen los siguientes datos:

Tabla 9. Resumen de datos de propiedades del aire a 39.07°C

| Parámetro                        | Valor  |
|----------------------------------|--|
| Densidad ( $\rho$ )              | 1.1303 kg/m <sup>3</sup>                                 |
| Calor específico ( $c_p$ )       | 1.007 kJ/kg.K  |
| Conductividad térmica ( $k$ )    | 0.0266 W/m.K   |
| Difusividad térmica ( $\alpha$ ) | 2.3332 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> |
| Viscosidad dinámica ( $\mu$ )    | 1.9137 * 10 <sup>-5</sup> kg/m.s                         |
| Viscosidad cinemática ( $\nu$ )  | 1.6933 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s              |
| Numero de Prandtl ( $Pr$ )       | 0.7257   |

Fuente: Elaboración propia.

Se reemplazan los datos en la fórmula del número de Rayleigh:

$$Ra = \left( \frac{9.81 * 3.2029 * 10^{-3} * (50 - 28.14) * (3 * 0.08)^3}{(1.6933 * 10^{-5})^2} \right) * 0.7257$$

$$Ra = 24.0318 * 10^6$$

El flujo es laminar debido que el número de Rayleigh es menor a 10<sup>9</sup>.

El número de Nusselt se calcula a través de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 * Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.43)$$

Se reemplazan los datos:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 * (24.0318 * 10^6)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7257)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 36.8082$$

Se reemplazan los datos en la fórmula de Nusselt, donde se había despejado el coeficiente de convección.

$$h_{conv,int} = \frac{0.0266 * 36.8082}{3 * 0.08}$$

$$h_{conv,int} = 4.0796 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Se reemplazan los datos obtenidos en la fórmula de la resistencia térmica de convección en el interior del deshidratador:

$$R_{conv,int} = \frac{1}{4.0796 * 0.01508}$$

$$R_{conv,int} = 16.2552 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### 3.8.6.5. Resistencia térmica por radiación de la placa interior del deshidratador

Se considera que en el interior existe un efecto invernadero. La Resistencia térmica de radiación en el interior se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{rad,int}} = \frac{1}{h_{\text{rad}} * A_{\text{interior}}} \quad (3.44)$$

El factor de radiación  $h_{\text{rad}}$  cuando existe un efecto invernadero, se obtiene de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$h_{\text{rad}} = \frac{\sigma * (T_1 + T_2) * (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{vidrio}}}{\varepsilon_{\text{vidrio}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{he-galv}}}{\varepsilon_{\text{he-galv}}}} \quad (3.45)$$

Datos:

Tabla 10. Resumen de datos de radiación en el interior

| Parámetro                      | Valor   |
|--------------------------------|---|
| $\varepsilon_{\text{vidrio}}$  | 0.9   |
| $\varepsilon_{\text{fe-galv}}$ | 0.28  |
| $\sigma$                       | $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ |
| $T_1$                          | $28.14^\circ\text{C} = 301.29 \text{ K}$        |
| $T_2$                          | $50^\circ\text{C} = 323.15 \text{ K}$           |

Fuente: Elaboración propia.

Se reemplazan los datos en la fórmula anterior:

$$h_{\text{rad}} = \frac{5.67 * 10^{-8} * (301.29 + 323.15) * (301.29^2 + 323.15^2)}{\frac{1 - 0.9}{0.9} + \frac{1 - 0.28}{0.28}}$$

$$h_{\text{rad}} = 2.5763 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Se calcula el área total de radiación:

$$\text{Área Total} = A_{\text{vidrio}} + A_{\text{base-fe}} + 2 * A_{\text{lateral-fe}} + A_{\text{trasera,int-fe}} + A_{\text{frontal,int-fe}}$$

$$\text{Área Total} = 1.0353 + 1 + 2 * 0.866 + 0.994 + 0.726$$

$$\text{Área Total} = 5.4873 \text{ m}^2$$

Se calcula la resistencia térmica de radiación:

$$R_{\text{rad,int}} = \frac{1}{2.5763 * 5.4873} = 0.0707 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### 3.8.6.6. Resistencia térmica por conducción de la placa interior del deshidratador

Con los datos de la placa de hierro galvanizado se obtiene la resistencia térmica por conducción en la placa de hierro galvanizado que se encuentra en la base en el interior del deshidratador.

$$L = 1.5 \text{ mm} = 0.0015 \text{ m}$$

$$\text{Área Total} = 4.452 \text{ m}^2$$

$$k_{fe-galv} = 46.5 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

Se reemplazan los datos en la fórmula (Cengel, 2007):

$$R_{cond-fe.galv} = \frac{L}{k_{EPS} * A} \quad (3.46)$$

$$R_{cond-fe.galv} = \frac{0.0015}{46.5 * 4.452} = 7.246 * 10^{-6} \text{ K/W}$$

### 3.8.6.7. Resistencia térmica por conducción del poliestireno (EPS)

Con los datos del poliestireno se obtiene la resistencia térmica por conducción del poliestireno.

$$L = 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

$$\text{Área Total} = 4.452 \text{ m}^2$$

$$k_{EPS} = 0.04 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

Se reemplazan los datos en la fórmula (Cengel, 2007):

$$R_{cond-EPS} = \frac{L}{k_{EPS} * A} \quad (3.47)$$

$$R_{cond-EPS} = \frac{0.02}{0.04 * 4.452} = 0.1123 \text{ K/W}$$

### 3.8.6.8. Resistencia térmica por conducción de la madera

Con los datos del poliestireno se obtiene la resistencia térmica por conducción de la madera.

$$L = 10 \text{ mm} = 0.01 \text{ m}$$

$$\text{Área Total} = 4.452 \text{ m}^2$$

$$k_{madera} = 0.14 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

Se reemplazan los datos en la fórmula (Cengel, 2007):

$$R_{cond-madera} = \frac{L}{k_{madera} * A} \quad (3.48)$$

$$R_{cond-madera} = \frac{0.01}{0.14 * 4.452} = 0.016 \text{ K/W}$$

### 3.8.6.9. Resistencia térmica por convección que sale del deshidratador

En el diseño, se dispone de tres salidas circulares de 8 cm de diámetro cada una; esto con la finalidad de que el flujo caliente de aire sea aprovechado eficientemente en el proceso de secado. Por lo tanto, para la resistencia térmica de convección a la salida se tendrá que hacer los cálculos previos de Número de Rayleigh y número de Nusselt, con el fin de hallar el coeficiente de convección.

La Resistencia térmica de convección entre el interior y exterior se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{conv,sal}} = \frac{1}{h_{\text{conv,sal}} * A_s} \quad (3.49)$$

El coeficiente de convección se obtiene de despejar  $h$  de la fórmula del Número de Nusselt (Cengel, 2007):

$$Nu = \frac{h * D}{k} \quad (3.50)$$

Se despeja y se obtiene:

$$h_{\text{conv,sal}} = \frac{k * Nu}{D}$$

Se calcula del Número de Rayleigh a través de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$Ra = \left( \frac{g * \beta * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) * D^3}{\nu^2} \right) * Pr \quad (3.51)$$

Se calcula temperatura promedio del interior y exterior del deshidratador, la temperatura de salida será de 45 °C:

$$T_{\text{prom}} = \frac{50 + 45}{2} = 47.5 \text{ °C} = 320.65 \text{ K}$$

Datos:

Tabla 11. Resumen de datos

| Parámetro                                 | Valor                                     |
|---|---|
| Gravedad ( $g$ )                          | 9.81 $m/s^2$                              |
| Temperatura interior ( $T_{\text{int}}$ ) | 50°C = 323.15 K                           |
| Temperatura exterior ( $T_{\text{ext}}$ ) | 45°C = 318.15 K                           |
| $\beta = 1/T_{\text{prom}}$               | 3.1187 * 10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> |

Fuente: Elaboración propia

De la tabla A-15 (Cengel, 2007) a una temperatura de 47.5 °C, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 12. Resumen de datos de propiedades del aire a 47.5 °C

| Parámetro                        | Valor  |
|----------------------------------|--|
| Densidad ( $\rho$ )              | 1.1005 kg/m <sup>3</sup>                                 |
| Calor específico ( $c_p$ )       | 1.007 kJ/kg.K  |
| Conductividad térmica ( $k$ )    | 0.02717 W/m.K  |
| Difusividad térmica ( $\alpha$ ) | 2.4515 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> |
| Viscosidad dinámica ( $\mu$ )    | 1.952 * 10 <sup>-5</sup> kg/m.s                          |
| Viscosidad cinemática ( $\nu$ )  | 1.774 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s               |
| Numero de Prandtl ( $Pr$ )       | 0.72345  |

Fuente: Elaboración propia

Se reemplazan los datos en la fórmula del número de Rayleigh:

$$Ra = \left( \frac{9.81 * 3.1187 * 10^{-3} * (50 - 45) * 0.08^3}{(1.774 * 10^{-5})^2} \right) * 0.72345$$

$$Ra = 180046.16$$

El flujo es laminar debido que el número de Rayleigh es menor a 10<sup>9</sup>.

El número de Nusselt se calcula a través de la siguiente fórmula (Cengel, 2007):

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 * Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.52)$$

Se reemplazan los datos:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 * 180046.16^{1/6}}{[1 + (0.559/0.72345)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 9.1067$$

Se reemplazan los datos en la fórmula de Nusselt, donde se había despejado el coeficiente de convección.

$$h_{conv,sal} = \frac{0.02717 * 9.1067}{0.08} = 3.0928 \text{ W/m}^2.K$$

Se reemplazan los datos obtenidos en la fórmula de la resistencia térmica de convección en el interior del deshidratador:

$$R_{conv,sal} = \frac{1}{3.0928 * 0.01508} = 21.442 \frac{K}{W}$$

### 3.8.6.10. Resistencias equivalentes

Desde el nodo inicial de la malla 1 hasta el nodo final de la malla 2 hay transferencia de calor desde una temperatura inicial de 28.14 °C hasta una temperatura final de 50 °C, que es la temperatura en el interior del deshidratador.

$$R_{eq1-2} = R_{eq1} + R_{eq2} \quad (3.53)$$

$$R_{eq1-2} = \left[ (R_{rad,solar} + R_{cond,vidrio})^{-1} + (R_{conv,ext})^{-1} \right]^{-1} + \left[ (R_{rad,int})^{-1} + (R_{conv,int})^{-1} \right]^{-1} \quad (3.54)$$

Se reemplazan los datos obtenidos:

$$R_{eq1-2} = \left[ (0.1911 \text{ K/W} + 0.003578 \text{ K/W})^{-1} + (0.0738 \text{ K/W})^{-1} \right]^{-1} + \left[ (0.0707 \text{ K/W})^{-1} + (0.2381 \text{ K/W})^{-1} \right]^{-1}$$

$$R_{eq1-2} = 0.10803 \text{ K/W}$$

Se calcula la resistencia térmica equivalente número 3 con los datos obtenidos anteriormente.

$$R_{eq3} = \left\{ \left[ R_{cond,placa} + R_{cond,poliestireno} + R_{cond,madera} + \left( (R_{conv,placa \text{ ext}})^{-1} + (R_{rad,placa \text{ ext}})^{-1} \right)^{-1} + R_{conv,sal \text{ ext}}^{-1} \right]^{-1} \right\} \quad (3.55)$$

$$R_{eq3} = \left\{ \left[ 7.246 * 10^{-6} + 0.1123 + 0.016 + \left( (R_{conv,placa \text{ ext}})^{-1} + (R_{rad,placa \text{ ext}})^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} + 43.916^{-1} \right\}^{-1}$$

$$R_{eq3} = 0.12793 \text{ K/W}$$

Para el cálculo de las resistencias térmicas por convección y radiación de la placa se han obtenido valores elevados por lo que el flujo calorífico no era significativo en el proceso, por lo tanto, no se consideran.

$$R_{eq,total} = R_{eq1-2} + R_{eq3}$$

$$R_{eq,total} = 0.10803 + 0.1279 = 0.23596 \text{ K/W}$$

### 3.8.6.11. Cálculo de flujo calorífico

El flujo calorífico se calcula a través de las siguientes fórmulas (Cengel, 2007):

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{eq,total}} \quad (3.56)$$

Se reemplazan los valores obtenidos:

$$\dot{Q} = \frac{45 - 28.14}{0.23596} = 71.453 \text{ W}$$

El calor requerido para deshidratar el banano es de  $5.49 W$ , así mismo el calor generado por el deshidratador es de  $71.453 W$ , de tal forma que el calor generado es superior al calor requerido por lo tanto se cumple con los requerimientos planteados.

$$\dot{Q}_{requerido} < \dot{Q}_{generado}$$

$$5.49 W < 71.453 W$$



## Capítulo 4

### Modelación matemática y análisis paramétrico del deshidratador

En este capítulo se analizarán las simulaciones del sistema del deshidratador y la variación de sus parámetros haciendo uso de la herramienta MATLAB.

#### 4.1. Etapa de procesamiento de datos

En este caso se tomaron datos de la Estación Meteorológica de la Universidad de Piura con tomas de cada 10 min que empiezan el 01/01/2019 a las 00:00 y terminan el 31/12/2019.

Lo que se hizo fue hacer un código que leyera de la tabla Excel de los datos de la Estación Meteorológica de los parámetros de entrada:

- Temperatura ambiente en °C
- Irradiancia en W/m<sup>2</sup>
- Velocidad el viento en m/s

Luego de que se leyeran estos datos se pasaba a promediar los parámetros en el siguiente orden:

1. Por meses del todo el año
2. Por días de cada mes
3. Por horas de cada mes

Resultando la siguiente tabla promedio:

Tabla 13. Tabla promedio de los parámetros de entrada

| Hora | Promedio de Temperatura ambiente [°C] | Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ] | Promedio de velocidad del viento [m/s] |
|------|---------------------------------------|---------------------------------|--|
| 0    | 21,34356257                           | 0                               | 0,909229711                            |
| 1    | 21,08967593                           | 0                               | 0,757301374                            |
| 2    | 20,85836299                           | 0                               | 0,677627902                            |
| 3    | 20,64820554                           | 0                               | 0,609174667                            |
| 4    | 20,47368898                           | 0                               | 0,586476681                            |
| 5    | 20,325617                             | 0                               | 0,558248421                            |
| 6    | 20,2349697                            | 9,659122717                     | 0,554643924                            |

|    |             |             |             |
|----|-------------|-------------|-------------|
| 7  | 20,60032237 | 99,72432796 | 0,760704152 |
| 8  | 21,56304521 | 267,3352076 | 0,950392985 |
| 9  | 22,99693228 | 470,1056878 | 1,004157173 |
| 10 | 24,68660778 | 668,668063  | 1,031402863 |
| 11 | 26,43505184 | 818,4701026 | 1,099361346 |
| 12 | 28,03461054 | 867,5531277 | 1,215999211 |
| 13 | 29,28118098 | 827,8910917 | 1,3818766   |
| 14 | 29,91280338 | 689,269437  | 1,588556814 |
| 15 | 29,79210499 | 516,1825503 | 1,846215118 |
| 16 | 28,8257065  | 329,4074533 | 2,049919888 |
| 17 | 27,21337846 | 144,0661472 | 2,05328405  |
| 18 | 25,37522924 | 15,9140617  | 1,906960872 |
| 19 | 23,98669888 | 0,001936124 | 1,861433798 |
| 20 | 23,02953234 | 0           | 1,77542072  |
| 21 | 22,37946855 | 0           | 1,562600486 |
| 22 | 21,94178998 | 0           | 1,325975209 |
| 23 | 21,6198578  | 0           | 1,104491701 |

Fuente: Elaboración propia

En este caso se usaron los promedios desde enero a diciembre debido a que se propone el uso del deshidratador durante todo el año, por lo que en base a estos valores promedio se hace la simulación y el diseño de este. Sin embargo, se procederán a analizar en diferentes variaciones de tiempo en horas y meses para poder llegar a conocer su funcionamiento óptimo.

#### 4.2. Simulación

Se hace un estudio de colectores solares de aire multipasos con y sin material de almacenamiento térmico en el cual se consideran los siguientes parámetros para el diseño de deshidratador propuesto en esta investigación (Uriol, 2016).

##### 4.2.1. Parámetros ambientales

Tabla 14. Parámetros ambientales para en análisis del deshidratador

| Símbolo | Magnitud                                 | Unidades         |
|---------|--|------------------|
| $I_t$   | Irradiancia total promedio               | 648.4682 $W/m^2$ |
| $T_a$   | Temperatura de aire atmosférico promedio | 28.14 °C         |
| $v$     | Velocidad del viento promedio            | 1.2155 m/s       |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Parámetros de la cubierta de vidrio

Tabla 15. Parámetros de la cubierta de vidrio para el análisis del deshidratador

| Símbolo         | Magnitud                                | Valor y unidades |
|-----------------|---|------------------|
| $L_c$           | Largo de la cubierta de vidrio          | 1 m              |
| $b_c$           | Ancho de la cubierta de vidrio          | 1 m              |
| $t_c$           | Espesor de la cubierta de vidrio        | 1 m              |
| $\alpha_c$      | Absortividad de la cubierta de vidrio   | 0.05             |
| $\tau_c$        | Transmisividad de la cubierta de vidrio | 0.9              |
| $\varepsilon_c$ | Emisividad de la cubierta de vidrio     | 0.9              |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3. Parámetros de la placa absorbente

Es la malla de acero inoxidable sobre la cual estarán las rodajas de banano.

Tabla 16. Parámetros de la placa absorbente para el análisis del deshidratador

| Símbolo         | Magnitud                                     | Valor y unidades    |
|-----------------|--|---------------------|
| $L_p$           | Largo de la placa absorbente                 | 1 m                 |
| $b_p$           | Ancho de la placa absorbente                 | 1 m                 |
| $t_p$           | Espesor de la placa absorbente               | 0.02 m              |
| $\alpha_p$      | Absortividad de la placa absorbente          | 0.64                |
| $\varepsilon_p$ | Emisividad de la placa absorbente            | 0.28                |
| $k_p$           | Conductividad térmica de la placa absorbente | $385 \text{ W/m.K}$ |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4. Parámetros de material de almacenamiento térmico

Se considera como material de almacenamiento de energía térmica al poliestireno.

Tabla 17. Parámetros del material de almacenamiento térmico del deshidratador

| Símbolo     | Magnitud   | Unidades                       |
|-------------|--|--------------------------------|
| $t_{st}$    | Espesor del material de almacenamiento               | 0.02 m                         |
| $\rho_{st}$ | Densidad del material de almacenamiento              | $19 \text{ kg/m}^3$            |
| $C_{st}$    | Calor específico del material de almacenamiento      | $1673.6 \text{ J/kg.K}$        |
| $T_{st}$    | Temperatura del material de almacenamiento           | $28.14 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| $m_{st}$    | Masa del material de almacenamiento                  | 0.3520 kg                      |
| $k_{st}$    | Conductividad térmica del material de almacenamiento | $0.04 \text{ W/m.K}$           |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5. Parámetros del colector solar

Tabla 18. Parámetros del colector solar para el análisis del deshidratador

| Símbolo | Magnitud   | Valor y unidades |
|---------|--|------------------|
| $\beta$ | Ángulo de inclinación del colector solar.  | 15°              |
| $m_a$   | Flujo másico de aire atmosférico.  | 0.30 kg/s        |
| $d$     | Altura del ducto de paso del aire atmosférico a través del colector solar.                   | 0.50 m           |
| $C_F$   | Calor específico a presión constante del flujo de aire.                                      | 1007 J/kg.K      |
| $t_b$   | Espesor del material de aislamiento de las paredes y fondo del colector solar.               | 0.50 m           |
| $k_b$   | Conductividad térmica del material de aislamiento de las paredes y fondo del colector solar. | 30.04 W/m.K      |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3. Análisis matemático

Se determinan las siguientes fórmulas para la disposición que se tomará en esta investigación (Uriol, 2016).

- Temperatura de la cubierta de vidrio

$$T_p = \frac{\alpha_c * I_t * A_c + hr_{pc}(T_p)A_p + hc_{pf}(T_{fprom})A_c + hc_{ca}(T_a)A_c + hr_{cs}(T_s)A_c}{hr_{pc} * A_c + hc_{pf} * A_c + hr_{cs} * A_c} \quad (4.1)$$

Donde:

$I_t$  [W/m<sup>2</sup>] es la irradiancia sobre la superficie inclinada.

$A_c$  [m<sup>2</sup>] es el área de la cubierta.

$hr_{pc}$  [W/m<sup>2</sup> . K] es el coeficiente de transferencia de calor entre la placa absorbente y cubierta.

$hr_{fc}$  [W/m<sup>2</sup> . K] es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el flujo de aire y la cubierta.

$hc_{ca}$  [W/m<sup>2</sup> . K] es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente.

$hr_{cs}$  [W/m<sup>2</sup> . K] es el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el cielo.

- Temperatura promedio de la cubierta de vidrio

$$T_f = \left( \frac{T_p + T_c}{2} \right) - \left( \left( \frac{T_p + T_c}{2} \right) - T_a \right) * e^{\left( \frac{-hc_f c A}{m_a C_f} \right)} \quad (4.2)$$

$$T_{fprom} = \left( \frac{T_p + T_c}{2} \right) - \left( \left( \frac{T_p + T_c}{2} \right) - T_a \right) * e^{\left( \frac{-0.5hc_f c A}{m_a C_f} \right)} \quad (4.3)$$

Donde  $C_f$  [J/kg.K] es el calor específico a presión constantes del flujo de aire y  $A$  [ $m^2$ ] es el área del colector solar.

- Temperatura de la placa absorbente

$$hc_{pst} = \frac{k_{st}}{t_{st}} \quad (4.4)$$

$hc_{pst}$ : Coeficiente de transferencia de calor por conducción entre placa absorbente y material de almacenamiento térmico.

$$T_p = \frac{\tau_c * \alpha_p * I_p * A_p + hr_{pc}(T_c)A_p + hc_{pf}(T_{fprom})A_p + hc_{pst}(T_{st})A_p}{hr_{pc}A_p + hc_{pf}A_p + hc_{pst}A_p} \quad (4.5)$$

#### 4.4. Análisis de resultados

##### 4.4.1. Gráficas de análisis de variación de parámetros en Matlab

En la Figura 21 se presenta la gráfica de la curva de la temperatura de la placa absorbente con material térmico, en rojo y sin material térmico, en negro. Se puede observar que al agregar el material de almacenamiento térmico la temperatura en la placa absorbente disminuye, precisamente porque es este material el que absorbe parte del calor dentro del colector y funciona como capa aislante. Se hicieron variaciones en los parámetros de longitud del material de almacenamiento térmico y se concluyó que el espesor óptimo es de 2 cm.

En la Figura 22 se muestran las curvas de las temperaturas en la placa absorbente, del flujo a la salida, en la cubierta de vidrio y del material de almacenamiento térmico en las 24 horas del día, donde se puede identificar que desde las 9:30 am hasta las 3:30 pm alcanzan mayores temperaturas en el deshidratador. Cabe resaltar que este análisis es teniendo como área de entrada tres circunferencias de 8 cm de diámetro tanto en la entrada como en la salida del deshidratador.

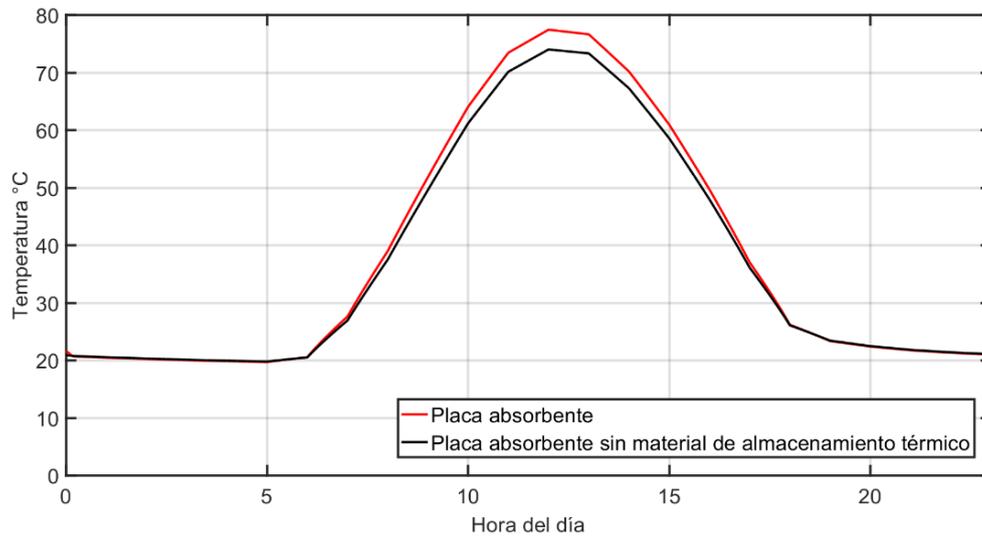


Figura 21. Temperatura de la placa absorbente con y sin material de aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia.

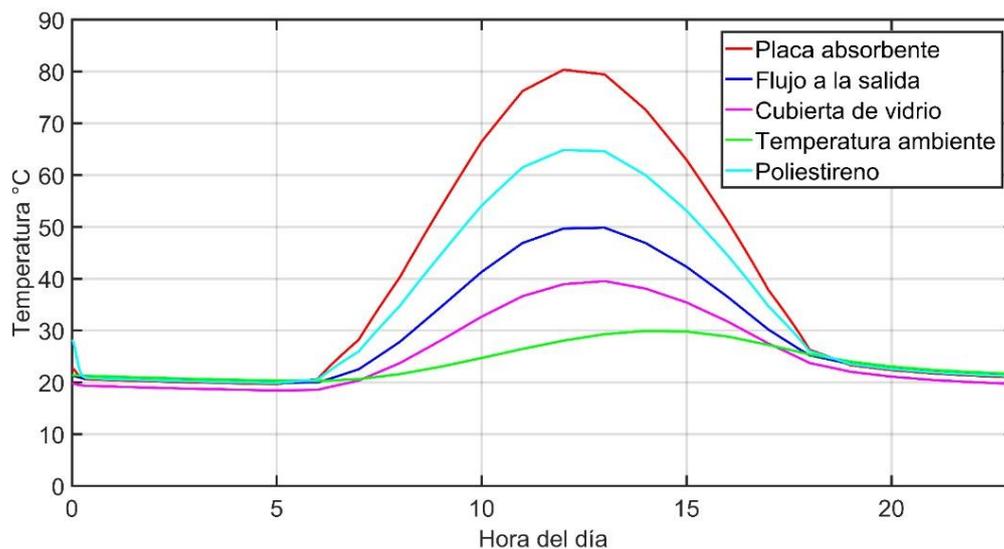


Figura 22. Variación de las temperaturas con diámetro de 8 cm en las entradas y salidas.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 23 se observa un incremento de temperatura en los elementos del deshidratador debido a que el diámetro del área de entrada varía a 6 cm, disminuyendo de este modo el flujo másico de aire.

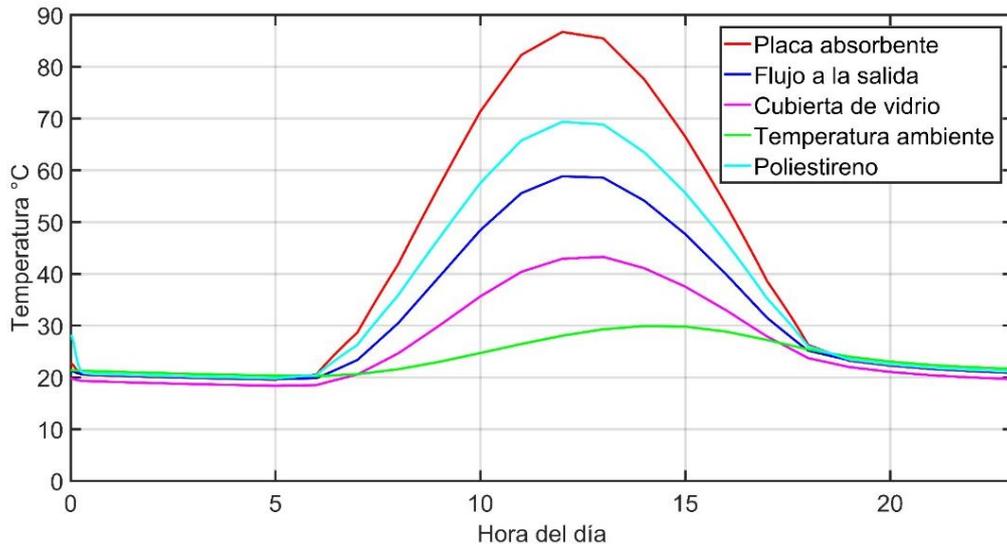


Figura 23. Variación de las temperaturas con diámetro de 6 cm en las entradas y salidas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24 se observa la gráfica de las diferentes temperaturas variando el largo y el ancho del deshidratador de 1 m x 1 m a 1.5 m x 1.5 m. En este caso, se observa que siendo de mayor tamaño, y dejando constante el área de entrada y salida del flujo térmico, se produce un aumento considerable de en promedio 15 grados de las temperaturas de análisis. Lo que sugiere que, si se hace más grande el deshidratador, el área de entrada y salida de flujo másico de aire debe aumentar también.

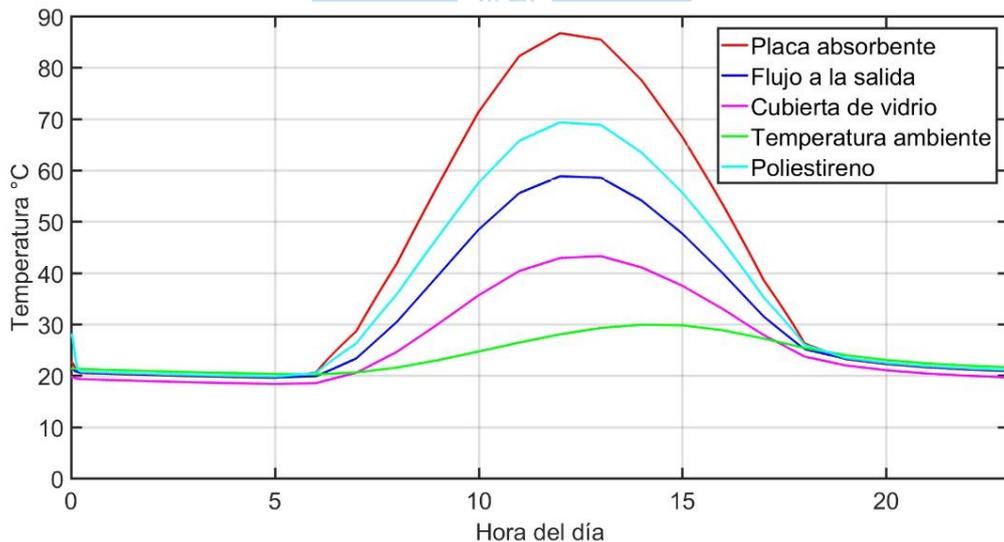


Figura 24. Variación de las temperaturas con dimensiones de 1.5 x 1.5 m en el colector.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2. Análisis en SolidWorks de la transferencia de calor en el sistema

La simulación de la transmisión de calor en el deshidratador ha sido realizada en el programa SolidWorks con ayuda de la herramienta Flow Simulation, la cual permite simular la transferencia de calor por conducción, convección y radiación en el modelo diseñado en el mismo programa.

Las características y propiedades de cada material que forma parte del deshidratador fueron introducidas en el programa para desarrollar la simulación, incluyendo las propiedades del banano con una humedad de 74.8%.

##### 4.4.2.1. Diseño del deshidratador

Se realizaron una serie de simulaciones, entre ellas una simulación con secciones rectangulares (entrada y salida rectangular de 850 x 50 mm. y 200 x 50 mm., respectivamente) y otra con entradas circulares de diámetro de 5 cm, pero se observaron temperaturas muy elevadas por lo que se optó por incrementar el diámetro a 8 cm con la finalidad de aumentar el flujo de aire y de esta forma la temperatura disminuya. Además, este diseño permite mayor versatilidad en casos que se necesite modificar el flujo de entrada por si las condiciones ambientales cambian tapando algunos de los orificios.

El fluido que atraviesa los tres conductos circulares ubicados en la parte frontal (entrada) es aire a una presión de 101.325 kPa con 74.49 % de humedad relativa. La presión de aire se mantiene constante ( $P_{salida} = P_{entrada}$ ).

Parámetros promedio del día entero:

- Temperatura = 23.8604°C
- Irradiación = 648.4682 W/m<sup>2</sup>
- Velocidad de entrada = 1.2155 m/s (Promedio de velocidad del aire en Piura respecto al Anexo A: Datos de estación meteorológica en Universidad de Piura).

Parámetros promedio de horas de trabajo (9:30 am – 3:30 pm):

- Temperatura = 28.14°C
- Irradiación = 673.95 W/m<sup>2</sup>
- Velocidad de entrada = 1.2155 m/s

En la Figura 25 se tiene una vista alzada del deshidratador en que se muestra la distribución de temperatura en grados Kelvin a la altura de la bandeja, lugar donde se depositan las rodajas de banano. Se puede apreciar claramente que en el segundo caso se tiene mayor concentración de altas temperaturas y esto es debido a que la temperatura ambiental e irradiación promedio para esta simulación son mayores con respecto al primero.

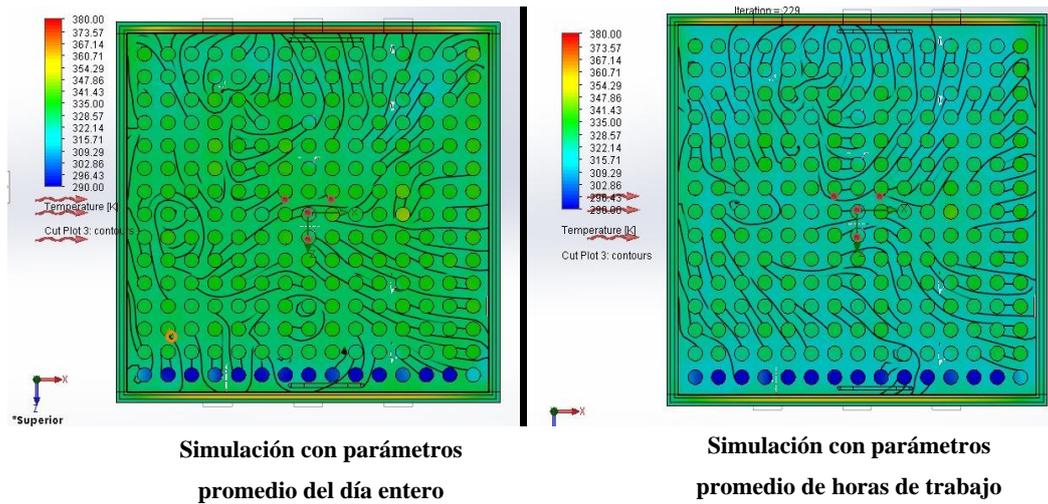


Figura 25. Vista alzada de la simulación térmica.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26 se puede observar un plano frontal y un mapeado de la distribución de temperaturas en grados Kelvin. En la entrada del flujo del aire externo se nota que es el lugar donde existe la menor temperatura y es debido a que este ingresa a una temperatura ambiental. Sin embargo, se mezcla con el aire interno y próximamente se traslada a la parte superior hasta su expulsión del deshidratador aumentando su temperatura en el recorrido.

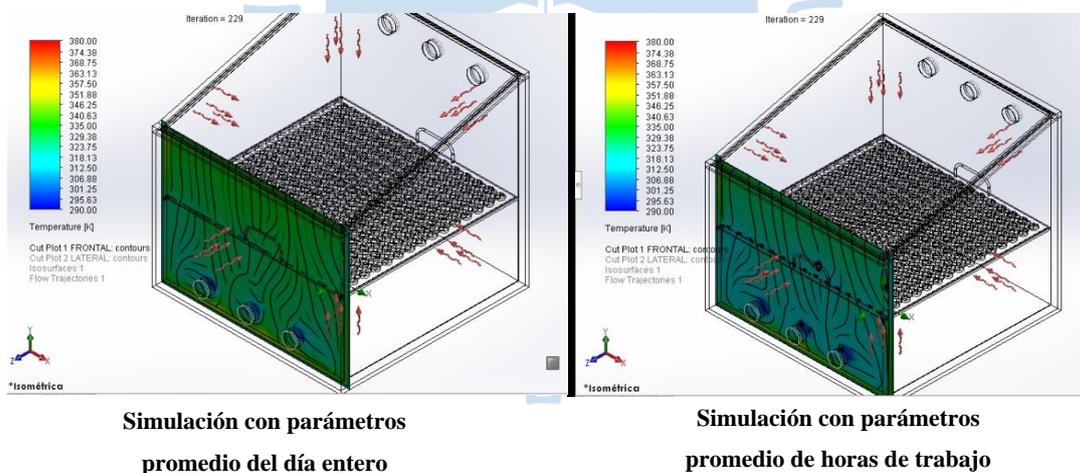


Figura 26. Vista isométrica de simulación térmica del plano frontal.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 27 se observa el plano frontal posterior con un mapeado de la distribución de temperaturas igual que el anterior. A diferencia del anterior se puede observar que en principio se tiene un promedio de temperaturas mayores que el plano frontal. Esto es debido a que el aire que inicialmente ingresa por la parte frontal se mezcla con el aire interno por lo que a medida que cuando este avanza se va calentando gradualmente, llegando así a la parte

posterior con una temperatura ligeramente mayor a la inicial. Además, se puede observar que en la parte superior se tiene una concentración de calor mayor. Esto es causado debido a que la circulación de aire finaliza aquí, siendo este el recorrido final y, por lo tanto, en el que mayor temperatura exista.

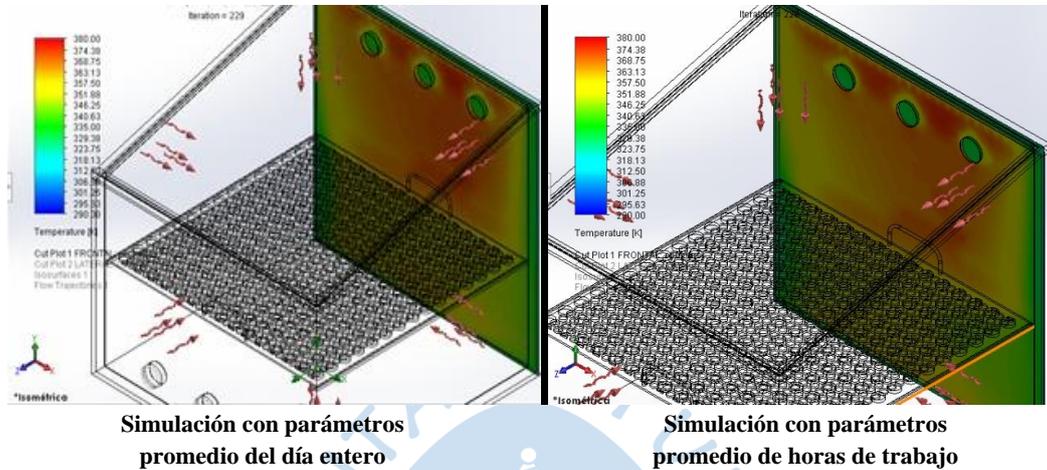


Figura 27. Vista isométrica de simulación térmica del plano frontal posterior.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 28 se tiene la gráfica del plano lateral de distribución de temperaturas en grados Kelvin. Se puede observar que las paredes internas del deshidratador están más calientes que otras superficies, esto se debe a la concentración de calor generada por las propiedades de la lámina de acero, la cual tiene una gran conducción de calor con respecto a los demás materiales.

Por último, se pueden distinguir dos zonas de distintas temperaturas (superior e inferior a la bandeja). Esto se debe a que el calor entrante por la cubierta de vidrio se ve ciertamente concentrado en la parte superior a causa del ingreso directo de calor por irradiación por la cubierta de vidrio y de aire en la zona inferior el cual circula hacia la zona superior aumentando gradualmente su temperatura y, además, es el causante que la región inferior es ligeramente menos caliente que la superior; pues este aire tiene una temperatura promedio de  $23.68^{\circ}\text{C}$  o  $28.14^{\circ}\text{C}$ , según los distintos casos a tomar.

En la Figura 29 se puede observar la variación de temperatura del flujo en grados Kelvin en forma de trayectorias, las cuales señalan su recorrido desde la entrada a expulsión de este en la parte superior - posterior. Se puede diferenciar dos zonas: inferior y superior a la bandeja.

La zona inferior varía entre  $40 - 50^{\circ}\text{C}$  y la superior entre  $67 - 80^{\circ}\text{C}$  en la figura izquierda; en cambio en la figura derecha, la zona inferior va de  $25 - 50^{\circ}\text{C}$  y la superior desde  $50 - 70^{\circ}\text{C}$ . El rango y magnitud de temperaturas se puede explicar debido a las propiedades del material de

aislamiento interno, disposición del deshidratador al ingreso de calor por radiación y el flujo de aire ambiental hacia el interior.

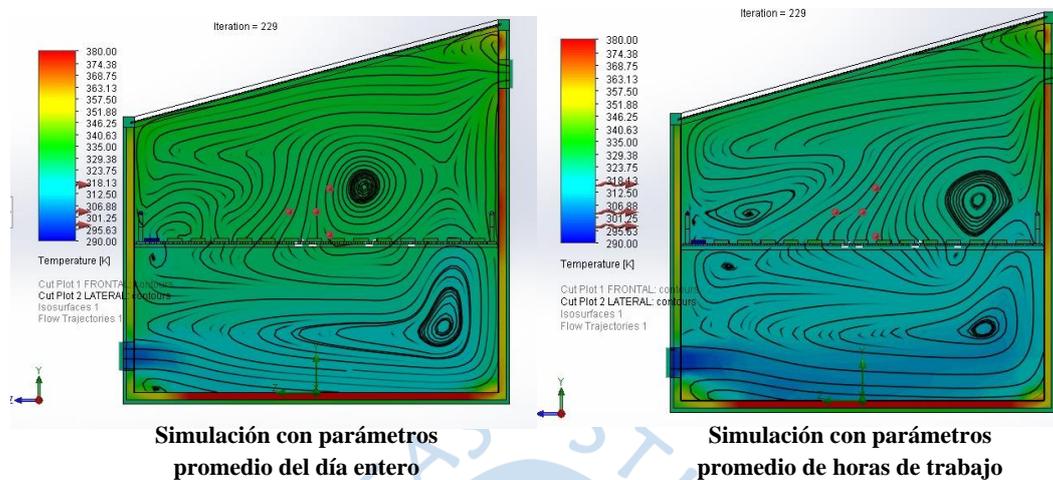


Figura 28. Vista lateral de la distribución térmica.

Fuente: Elaboración propia.

En la zona superior se da la entrada de calor directa por irradiación, lo que favorece a que haya mayores concentraciones de altas temperaturas. Además, a esto se le suma el fluido el cual es calentado gradualmente desde su ingreso en la zona inferior frontal.

En la zona inferior se tiene una concentración de temperaturas menores con respecto a la zona superior y se debe a que el aire ambiental entrante ingresa a una temperatura promedio de 23.68°C o 28.14°C, según los distintos casos a tomar.

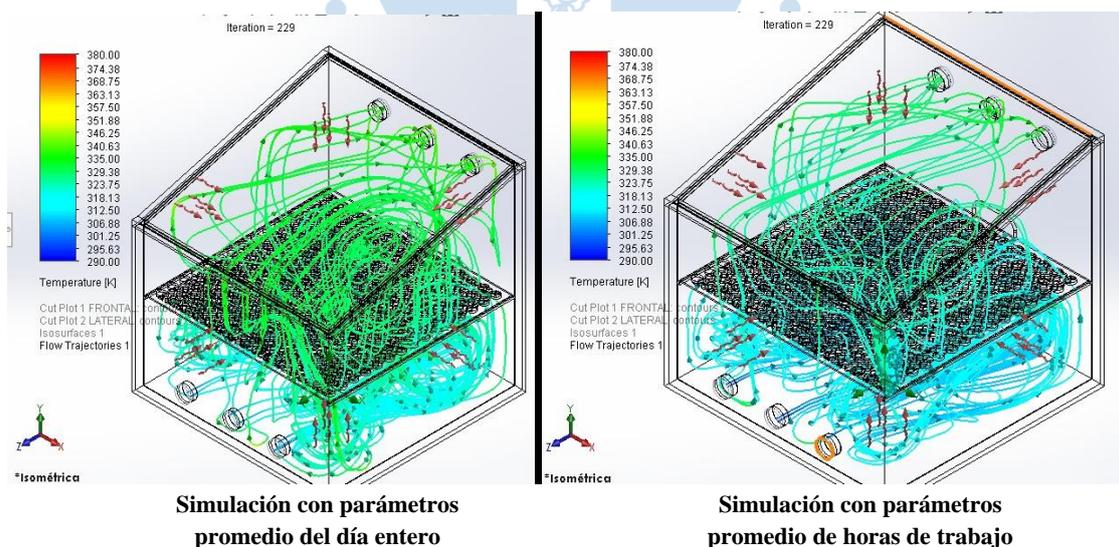


Figura 29. Vista de trayectoria de flujo de temperaturas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30, se observa las líneas de la trayectoria y magnitud de la velocidad de ingreso de aire al interior del deshidratador. Como se puede apreciar, esta es muy lenta y se

puede explicar debido a que no existe una convección forzada, es decir, el aire externo no es impulsado al interior dejando así que la velocidad interna se justifique únicamente por la velocidad del aire del ambiente. También se puede apreciar que las trayectorias de la velocidad se trasladan a la parte superior y esto es porque solo existe una salida de fluido del deshidratador y se encuentra en esta zona.

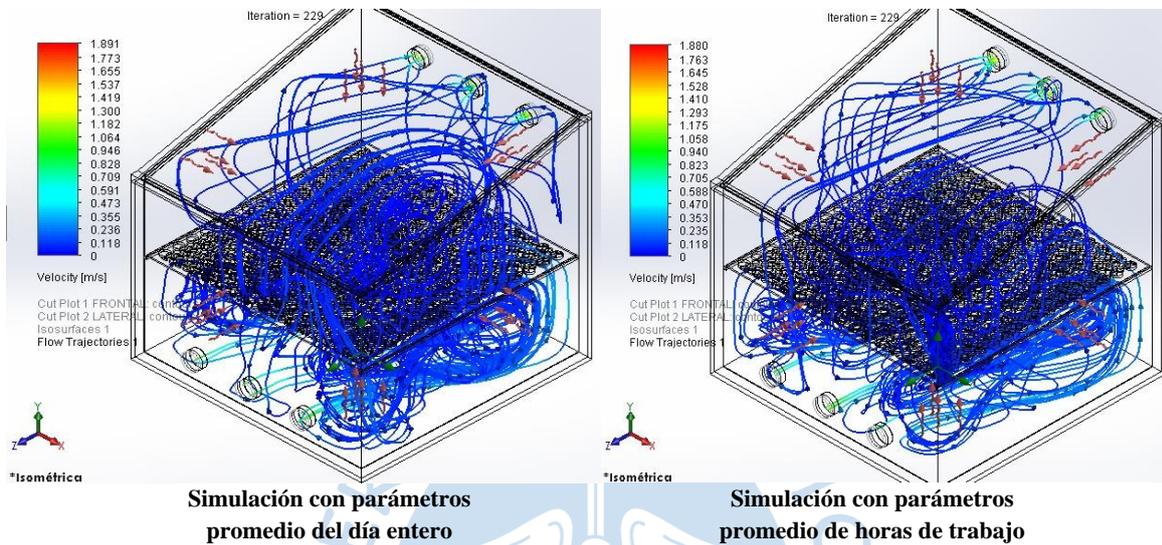


Figura 30. Vista de la velocidad en trayectoria de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.3. Análisis en ANSYS de transferencia de calor en una rodaja de plátano

Para poder realizar esta simulación, se procedió a utilizar el software ANSYS 19.2, para ser más específico su herramienta de Workbench, en la cual se importó el sólido de representación desde otro software (SolidWorks), siendo este un cilindro corto de 40 mm. de diámetro y 10 mm. de espesor, con las propiedades características del banano y además tomando como parámetro de entrada la temperatura inicial ambiente de 23.8604°C.

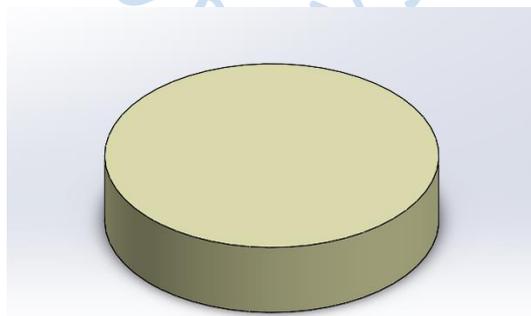


Figura 31. Representación de la rodaja de banano en SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia.

Se procede luego a realizar el mallado y colocar los parámetros de referencia que van a servir para poder ejecutar la simulación; además de colocar el tiempo de secado de dicho producto, que vendrían a ser 6 horas equivalentes a 21600 segundos. Los resultados muestran tanto el comportamiento del banano, así como el incremento de la temperatura en el mismo.

Como se puede observar en la Figura 32, la zona donde el calor más va a incidir va a ser en los bordes, pues se nota por su coloración roja y amarilla, luego va disminuyendo la temperatura progresivamente hacia el centro que será donde esté menos caliente; pero eso no quiere decir que el producto se encuentre crudo o sin influencia del calor.

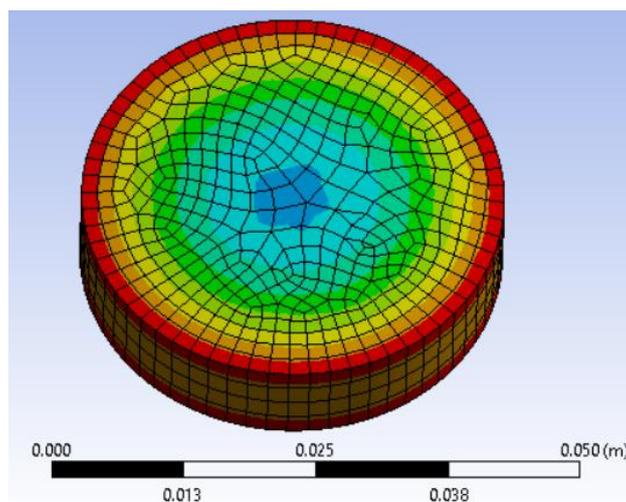


Figura 32. Simulación del comportamiento del banano durante el proceso de secado.

Fuente: Elaboración propia.

Para que sea más claro aún, la gráfica de la Figura 33 detalla cómo será el incremento de temperatura con respecto al tiempo de secado que este tendrá, viendo que llegará a una constante de aproximadamente  $44.66^{\circ}\text{C}$  al terminar los 21600 segundos.

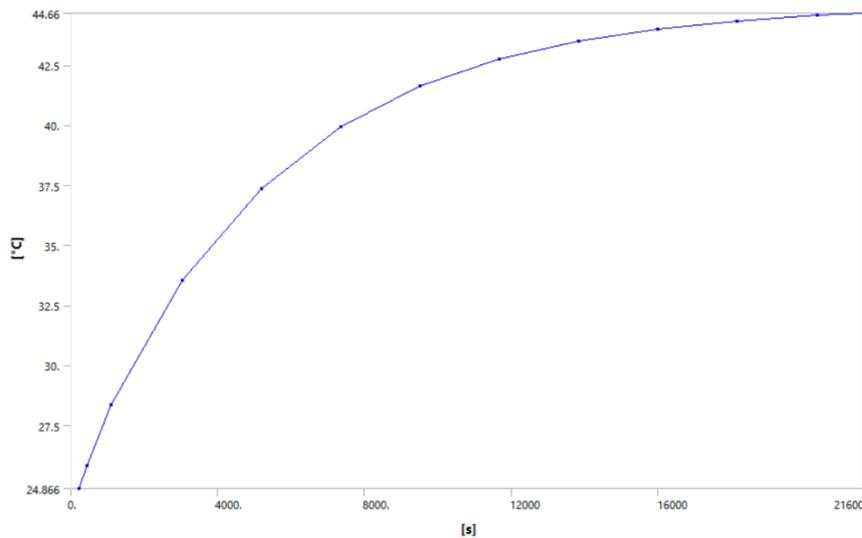


Figura 33. Incremento de temperatura del tiempo de secado de la rodaja de banano.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 19 se plasma los valores del incremento de temperatura de una rodaja de banano respecto al tiempo a partir de la simulación en ANSYS.

Tabla 19. Incremento de la temperatura de una rodaja de plátano simulado en ANSYS.

| Paso | Tiempo [seg] | $T_{min}$ [°C] | $T_{máx}$ [°C] | $T_{media}$ [°C] |
|------|--------------|----------------|----------------|------------------|
| 1    | 216          | 24.866         | 24.877         | 24.872           |
| 2    | 432          | 25.829         | 25.839         | 25.834           |
| 3    | 1080         | 28.338         | 28.348         | 28.343           |
| 4    | 3024         | 33.524         | 33.531         | 33.528           |
| 5    | 5184         | 37.36          | 37.365         | 37.363           |
| 6    | 7344         | 39.914         | 39.917         | 39.916           |
| 7    | 9504         | 41.614         | 41.616         | 41.615           |
| 8    | 11664        | 42.746         | 42.747         | 42.747           |
| 9    | 13824        | 43.499         | 43.5           | 43.5             |
| 10   | 15984        | 44.001         | 44.002         | 44.001           |
| 11   | 18144        | 44.335         | 44.335         | 44.335           |
| 12   | 20304        | 44.557         | 44.558         | 44.557           |
| 13   | 21600        | 44.66          | 44.66          | 44.66            |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5. Comparación de resultados de simulaciones

Estas simulaciones se han realizado bajo los siguientes parámetros iniciales:

- Temperatura = 28.14°C
- Irradiación = 673.95 W/m<sup>2</sup>
- Velocidad de entrada = 1.2155 m/s

Tabla 20. Comparación de resultados

| Programa<br>Temperatura [°C]       | MATLAB | SOLIDWORKS |
|------------------------------------|--------|------------|
| Placa absorbente                   | 80     | 85         |
| Vidrio                             | 40     | 49         |
| Flujo de salida                    | 51     | 62         |
| Material de almacenamiento térmico | 66     | 72         |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 20 se puede observar que los resultados de las temperaturas en los distintos puntos de análisis difieren tanto en Matlab como SolidWorks, debido a que en el primero se utilizan ecuaciones de transferencia de calor, se ingresan parámetros considerados en las ecuaciones y se hacen iteraciones en un intervalo de tiempo. Mientras que en el segundo se diseña el sólido que se desea simular, se ingresan los parámetros de cada material utilizado y las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesto, posteriormente se hace un mallado por elementos finitos, se itera por lo que esta simulación es más precisa.

Cabe resaltar, que otra explicación a las distintas temperaturas en los materiales se debe a que en SolidWorks se simuló que todas las paredes interiores del deshidratador cuentan con la secuencia de capas de recubrimiento (poliestireno y madera), caso contrario a lo que sucede en Matlab puesto que, se realizó un análisis bidimensional ya que se utiliza únicamente una sola pared que posee dichas capas de recubrimiento.



## Capítulo 5

### Mantenimiento del deshidratador

#### 5.1. Mantenimiento de secadores solares

Generalmente el mantenimiento de secadores solares no requiere de un alto nivel técnico, pues el principal problema radica únicamente en higiene debido al contacto que hay entre el alimento y bandeja, entorno limpio por cuestiones de salubridad y desgaste de materiales por exposición al sol (Blanco Cano & Valdecabres Sanmartín, 2016).

##### 5.1.1. Tareas de mantenimiento en cada uso del secador

Puesto que la principal función del secador trata siempre con alimentos se tiene que garantizar una buena condición higiénica, así que en esto se enfocarán las tareas a realizar para preservar el correcto uso del secador y asegurar la calidad del proceso de secado:

- Tras cada uso limpiar bandeja y rejilla debido a que pueden quedar restos pegados del producto. Esto ocurre generalmente cuando el producto contiene mucho azúcar.
- Limpiar todo el entorno interno periódicamente por existencia de polvo. Este proceso se debe hacer también en la bandeja o rejilla tras cada uso.
- La rejilla o bandeja no se debe sobrecargar.
- Limpiar regularmente el cristal de vidrio ya que así facilitaría el total aprovechamiento de los rayos solares para el proceso.
- Cubrir orificios de entrada y salida del secador siempre que no haya sol.
- No permitir que se forme condensación en el cristal de vidrio en horas de noche y mañana, puesto que pueden caer gotas al producto lo cual interrumpiría el correcto proceso de secado.

##### 5.1.2. Tareas de mantenimiento a largo plazo

Además de asegurar un ambiente propicio para el producto también se debe asegurar el correcto funcionamiento del deshidratador por lo que este tipo de tareas van enfocadas a cuestiones de funcionalidad y durabilidad.

Dependiendo del entorno diario al que esté expuesto el deshidratador el usuario escogerá la frecuencia del chequeo, pero generalmente está entre dos o tres meses.

- Si el secadero no tiene el mismo rendimiento (secado de frutos en un promedio de horas mayor al usual) significa que hay fugas y esto se da en las juntas. Para esto se puede usar distintos métodos. Uno de ellos es usar agua con jabón, al aplicarlo en la junta si burbujea significa que existe fuga, de lo contrario, no. Para solucionar esto se puede usar silicona, de esa forma se sella.
- Debido a que el deshidratador está hecho de madera hay que asegurarla con barniz, de esa forma se protege contra humedad del ambiente. Se debe revisar periódicamente que no exista ninguna parte de la superficie que por lo menos no tenga espacios sin barnizar.
- El cristal de vidrio debe estar libre de rayaduras. Si esto sucede se debe reemplazar inmediatamente porque se puede romper y ofusca el ingreso regular de rayos solares en todo el ambiente interno. Además, debe permanecer limpio por dentro y por fuera. En caso de que finalmente se opte por usar plástico, con el tiempo perderá transparencia debido a efectos del sol por lo que tiene que ser reemplazado consecutivamente.
- El interior del secador está cubierto por láminas de hierro galvanizado que concentra la energía otorgada por el sol, por lo que hay que mantenerlos siempre limpios. Para su limpieza se pueden utilizar productos que otorguen brillantez, de esa forma los rayos solares se reflejan mejor.
- Revisar si existiese grietas en la madera. De ser el caso se debe rellenar y si el daño fuera grave, reemplazar.

## **Capítulo 6**

### **Impacto del proyecto**

#### **6.1. Identificación del problema**

La situación del Perú con respecto a la obesidad y sobrepeso viene siendo preocupante en los últimos años, agentes como la mala alimentación como, por ejemplo, el alto consumo de alimentos procesados, el estilo de vida y la poca importancia que se le toma a estas enfermedades hacen que año a año las cifras aumenten, llegando de esta manera a indicar que un aproximado de 14 millones de personas en el país padezcan estas enfermedades. Esta cifra se reparte entre niños, adolescentes, jóvenes y adultos, siendo a partir de los 15 años los más afectados según cifras del estado (Anón s. f.; Gestión 2020).

La región Piura, según estadísticas del MINSA (Ministerio de Salud) se encuentra en el puesto 10 en casos de obesidad y sobrepeso a nivel nacional, se indica que por lo menos el 50% de piuranos padecen esta enfermedad. Como estudiantes universitarios, se puede confirmar que a diario la mala alimentación está presente ya que muchas veces por motivo de la cantidad de horas que se pasan en la universidad sobre todo a horas de almuerzo, los estudiantes prefieren comer algo ligero como un snack que por lo general son alimentos procesados y/o comida chatarra (El Regional de Piura s. f.; El Tiempo 2019).

En la actualidad, debido a la pandemia del Covid-19 o comúnmente llamado Coronavirus, el estilo de vida de todas las personas se ha vuelto muy sedentario causando el aumento masivo de casos por obesidad y sobrepeso, causando que sean más susceptibles de contraer esta enfermedad. Es por ello, que lo recomendable es darse un tiempo para realizar actividad física en casa ya que para tratar esta enfermedad no solo se debe realizar dieta o comer menos, es importante adoptar un buen hábito alimenticio y buscar alimentos saludables, ya que lo que se busca es bajar la grasa y no solo la masa muscular (Gestión 2020).

La Figura 34 muestra el porcentaje de peruanos con obesidad en un rango de edad de 15 años a más, además se distribuye según el sexo y área de residencia (urbana o rural) a nivel nacional. Esta estadística fue realizada por el INEI considerando el margen desde 2014 a 2018.



Figura 34. Estadística de peruanos con obesidad

Fuente: Tomado de “*Obesidad y sobrepeso: ¿Cuántas personas presentan estas condiciones en el Perú?*” (INEI)

## 6.2. Propuesta de proyecto sostenible

De acuerdo con estudios de mercado, las frutas deshidratadas vienen siendo una buena opción para proyectos de negocio debido a que desde hace algunos años países de Europa y Estados Unidos optan por esta opción saludable de consumo, convirtiéndose en los principales focos de mercado para los exportadores de estos productos (Acevedo 2019, Anón s. f.) (ProChile, 2011) (MINCETUR).

En Perú, el mercado de frutas deshidratadas es reciente, pero viene creciendo rápidamente ya que la aceptación del producto es buena no solo por el sabor que obtiene sino también porque se conserva más que una fruta fresca. Para los productores, existen ventajas debido a que lo sobrante de su producción puede ser aprovechado pues le da un valor agregado (Anón s. f.; Solano 2019).

Para este trabajo del curso Transmisión de Calor, a partir de la problemática identificada y basándose en la viabilidad y sostenibilidad del producto en mercados exteriores se propone la producción de snacks nutritivos teniendo como materia prima al banano, que es uno de los productos principales de exportación de la región Piura. Los snacks no reemplazan a las comidas principales, pero sirven como sustituto ante la compra de comida chatarra, este snack

tiene un sabor dulce natural a consecuencia del proceso de deshidratación, es fácil de empaquetar. Además, el deshidratador a utilizar será ecológico por lo que los costes y gastos no serán exorbitantes y el producto se podrá vender a un precio cómodo para el consumidor.

### 6.3. Producción de banano

#### 6.3.1. Regional

Desde el 2009, las exportaciones en la región vienen creciendo de tal manera que posicionan a Piura entre las principales productoras del país. El banano es una fuente de ingreso confiable pues todo el año es su temporada y aparte, al ser un alimento básico su consumo es alto por lo tanto también su demanda, generando así, ingresos y empleos para las familias que viven de este alimento. (Pazos 2017)

El valle de Chira por su parte produce el 90% de las exportaciones en todo el Perú, para el año 2014 - 2015 contaba con 7000 ha en vías de expansión para los siguientes años. (PERÚ s. f.)



Figura 35. Evolución de la exportación piurana 2009-2014

Fuente: INFOTRADE - PROMPERO 2014 - Elaboración DIRCETUR.

#### 6.3.2. Nacional

La principal producción de banano se encuentra en el norte del país: Piura, Tumbes y Lambayeque son las principales regiones productoras. En agosto de 2017, las exportaciones de banano orgánico significaron un aumento del 12% ya que se consiguió una suma de US\$114.4 millones, una cifra mejor a la del año anterior (Luque s. f.; Regiones s. f.).

#### 6.3.3. Global

Debido a que se produce banano orgánico, el consumo viene siendo mayor ya que crea confianza en las personas que cada vez buscan productos naturales que no usen pesticidas.

Actualmente, el Perú exporta a un total de 31 países, siendo el mercado europeo su principal destino de exportación (Ministerio de agricultura y riego, 2018).

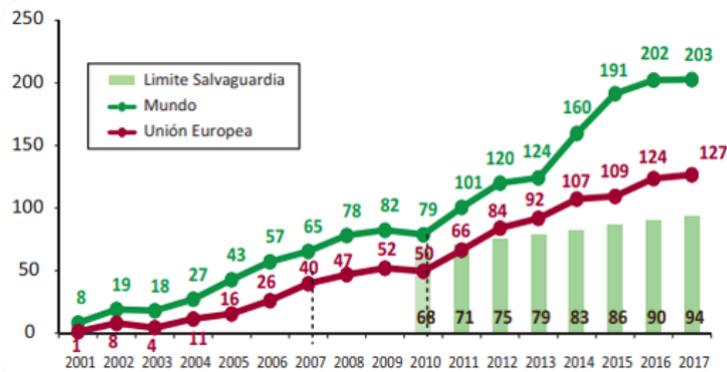


Figura 36. Exportación peruana de bananos al mundo y la UE

Fuente: Texto acuerdo comercial Perú-UE

#### 6.4. Sostenibilidad y viabilidad

Antes de poner en marcha el proyecto, lo primero que se tiene que realizar es un plan estratégico. Para ello, se necesita de conceptos fundamentales que son la sostenibilidad y la viabilidad, es por eso por lo que es necesario identificarlas y diferenciarlas. La viabilidad se da durante el proceso del proyecto, se ve que un producto es viable cuando el plan estratégico diseñado tiene los resultados esperados. En cambio, la sostenibilidad se da cuando ya se ha finalizado el plan estratégico y el producto ya está en el mercado, es sostenible cuando obtienes beneficios por un largo tiempo sin que se invierta más en él.

Como base para generar una buena viabilidad y sostenibilidad, estas investigaciones y tesis ayudarán como guía para la realización del plan estratégico y el impacto que se quiere generar (Ancajima et al. 2019, Anón s. f.; Cornejo et al. 2019).

##### 6.4.1. Impacto social

Para definir qué imagen se quiere proyectar en el producto se deben tener claros los objetivos a alcanzar pues estos snacks no son solo un producto más a la venta sino se busca que las personas consuman más productos nacionales y prefieran el azúcar natural de las frutas a productos que dañan la salud poco a poco. Este producto puede tener variaciones se le puede añadir sal, chocolate a base de cacao que es bien sabido que Piura también es un principal productor, o previamente al secado añadirle jugo de otra fruta para que en su etapa final tenga una combinación de sabor.

### **6.4.2. Impacto global**

Como se mencionó anteriormente el mercado de productos deshidratados viene en ascenso en el exterior, pero en Perú aún necesita más enfoque, es por ello por lo que con este proyecto se buscará impulsar desde la región Piura el consumo de estos snacks nutritivos. Se empezará por medio de mercados pequeños universidades y colegios dentro de la región, cuando llegue a obtener un mayor alcance el producto se expandirá al mercado nacional. Luego, por medio de las alianzas creadas por la exportación del banano orgánico se ofrecerá el producto a la venta, de esta manera el Perú entrará a un nuevo mercado con una misma materia prima.

Es un producto de impacto global porque está al alcance de todos y produce un hábito de consumo positivo ya que uno de sus principales atractivos que es un mayor tiempo de conservación se logra de forma natural y sin añadirle algún químico.

### **6.4.3. Impacto económico**

En este caso el proceso productivo de los snacks de banano deshidratado no representa un alto coste a diferencia de otras productoras, pues esencialmente el deshidratador estará hecho a bases de productos reciclables y su funcionamiento será a base de energía renovable, no se fuerza el secado del banano. Una vez terminado el proceso de secado el banano cortado no tiene que pasar por algún otro proceso o adición de químicos, pues está listo para el consumo apenas llega a la humedad requerida de secado.

Para los productores de banano, esta idea de negocio resulta muy beneficiosa pues sus pérdidas son menores ya que le dan un valor agregado al banano producido, no solo se quedan con la materia prima, esta se convierte en algo más y no solo genera ganancias sino más empleo y productividad nacional.

### **6.4.4. Impacto ambiental**

Este proyecto puede ser definido como uno eco-amigable pues busca otra alternativa para la construcción de un deshidratador, usando material reciclable y a la vez aprovechando toda la materia prima que producen los cultivos de banano en Piura. Existen distintos métodos para el secado de una fruta, en este caso el de banano, se eligió un secador solar directo porque es el más natural y no daña el ambiente ni al consumidor en ningún sentido. El secado por osmosis utiliza previamente un químico para que el fruto pueda secarse más rápido. Para el secado a gas se necesita una máquina industrial, al igual que el anterior el secado es forzado, tal vez no daña al fruto a deshidratar y es más eficiente en cuanto a rapidez y obteniendo un menor grado de error para determinar que el fruto está listo. Pero, requiere un mayor coste de producción y lo que se busca, es una alternativa al alcance de pequeños productores (Espinoza y Patricio s. f.).



## Conclusiones

Para el diseño del deshidratador propuesto en este trabajo se aplicaron conocimientos adquiridos en el curso de Transferencia de calor además de investigaciones sobre este sistema, ya que con un análisis de los mecanismos de transferencia de calor que influyen en el mismo y un estudio de la geometría se pudo obtener un diseño óptimo para el proceso que se desarrolla. Así mismo, es importante la selección de materiales para la construcción del deshidratador, como la madera en la superficie externa, placas de hierro galvanizado en el interior y el poliestireno como material aislante, además el material utilizado de la bandeja sobre el que se encontrará el producto a deshidratar es de acero inoxidable por razones de salubridad ya que el producto obtenido será para consumo humano.

El uso de ventiladores axiales podría optimizar el proceso de deshidratación cuando se trabaje en ambientes donde las corrientes de aire del exterior durante el día sean variables, sin embargo, en la ciudad de Piura, que es donde estará ubicado el deshidratador, la variación de la velocidad de aire es insignificante, por tal motivo no se ha considerado un ventilador en el diseño propuesto. Además, los cálculos previos y las simulaciones realizadas en Matlab y SolidWorks permiten identificar que a mayor cantidad orificios en la entrada y salida del sistema, supondrá una mejor alternativa de solución frente a diferentes condiciones ambientales que se pueden producir por el clima, como la variación de la velocidad del viento.

La simulación del proceso de deshidratación en SolidWorks con la herramienta Flow Simulation permite visualizar el comportamiento del fluido en el interior del deshidratador de tal modo que se pueden evaluar diferentes parámetros como: temperatura, velocidad del fluido, entre otros. Es importante realizar esta simulación previa a la construcción ya que de esta manera se puede optimizar el diseño.

Gracias a la modelación y posterior simulación en diferentes softwares, tales como SolidWorks, ANSYS y Matlab, se ha podido notar que el diseño presentado cumple con los requerimientos dados al inicio de la investigación, tanto en el comportamiento termodinámico del propio deshidratador, así como la transferencia de calor hacia el producto a secar, que es el

banano; pues los resultados se encuentran dentro de un rango razonable y los valores de referencia consultados.

En el diseño del deshidratador es fundamental el análisis de los parámetros del producto a deshidratar debido a que se debe trabajar en un rango adecuado de temperaturas para obtener una deshidratación adecuada del producto y evitar una deshidratación parcial o muy severa del mismo.

La variación de resultados de las temperaturas en los distintos puntos de estudio tanto en Matlab como SolidWorks se debe al tipo de análisis. En el primero se realiza un análisis bidimensional puesto que se utilizan ecuaciones y se hacen iteraciones en un intervalo de tiempo mientras que en el segundo se introduce el sólido diseñado en 3D, que posteriormente tras un mallado por elementos finitos y con ciertos parámetros de entrada (características relevantes de los materiales y condiciones ambientales), se itera, haciendo de esta simulación la más precisa.

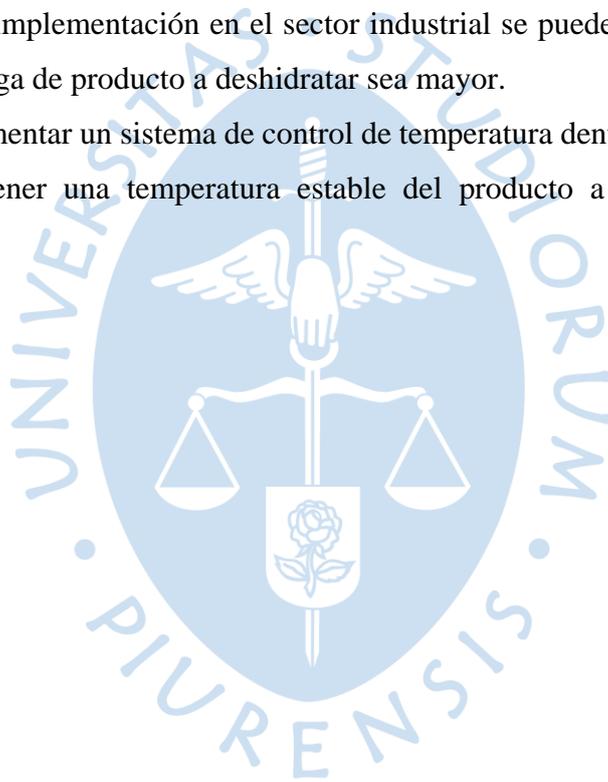


### **Recomendaciones**

Rediseñar la geometría del deshidratador con el fin de buscar su máxima eficiencia según los resultados que se obtengan de manera experimental, debido a que el diseño planteado se basa en simulaciones que no han sido validadas experimentalmente.

Con miras a su implementación en el sector industrial se puede modificar su geometría de tal modo que la carga de producto a deshidratar sea mayor.

Se puede implementar un sistema de control de temperatura dentro del deshidratador con la finalidad de mantener una temperatura estable del producto a deshidratar para poder optimizar el proceso.





## Referencias bibliográficas

- Alejo, J. L., & Leyva, R. M. (2010). Radiaciones electromagnéticas y salud en la investigación médica . *Revista Cubana de Medicina Militar* .
- Almada, M., Cáceres, M. S., Machaín-Singer, M., & Claude Pulfer, J. (2005). *Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Asunción: Fundación Celestina Pérez de Almada. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>
- Bayer, J. (s.f.). *Los colectores solares, ¿Un nuevo campo de aplicación para los esmaltes?*
- Berville, C., & Croitoru, C. (2019). Recent Advances in Solar Drying Technologies- A Short Review. *2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, (págs. 294-298). Timisoara, Romania.
- Blanco Cano, L., & Valdecabres Sanmartín, L. (2016). *Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales*.
- Bohórquez, J. (2016). *Diseño de un colector solar de placa plana para la deshidratación de productos agroindustriales*. Universidad Libre, Departamento de ingeniería mecánica, Bogotá.
- Bravo Avalos, M. B., Baño Ayala, D. J., & Cajamarca Carrazco, D. I. (2018). *Diseño de un deshidratador mixto indirecto de frutas*.
- Caicedo, L. (2008). *Aprovechamiento de los Excedentes de Banano para la Obtención de un Producto Tipo Bombón*. Guayaquil.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Tercera edición ed.). Nevada : McGraw-Hill.
- CENSOLAR. (2007). *Instalaciones de Energia Solar. Tomo III*. España: Promotora General de Estudios S.A.

- Chan Gonzalez, G. E. (2013). *Construcción de un secador solar de tipo indirecto para la deshidratación de productos agrícolas*. Universidad de Quintana Roo.
- Ching, L., Sachin, V., Sze, P., & Arun, S. (2012). *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*. Malasia.
- Choi, Y., & Okos, M. (1986). Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods. *Journal of Food Process and Applications*, 93-101.
- Cocina Solar. (2018). *Cocina con el sol*. Recuperado el 05 de Abril de 2020, de <https://gastronomiasolar.com/ph-alimentos/>
- Cornejo, J., Lopez, M., Ríos, E., Montalván, R., & Roa, L. (2019). *Diseño de una planta de producción de barras nutritivas*. Piura.
- Cuarán Pantoja, S., & Tinillo Córdova, I. D. (2013). Diseño y Construcción de un prototipo deshidratador atmosférico de bandejas discontinuo con circulación forzada de una capacidad de  $0.05\text{m}^3$  utilizando energía solar. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- De la Vega Sanchez, F. F. (2017). *Diseño y construcción de un deshidratador de plátano mediante el aprovechamiento de energía solar pasiva para los laboratorios de la facultad ingeniería civil y mecánica*. Ambato, Ecuador.
- Estación meteorológica en Universidad de Piura. (s.f.). Obtenido de <http://udep.edu.pe/met/>
- Gallego Yanza, C. J. (2006). *Diseño de un horno por convección forzada para la deshidratación de frutas y hortalizas*. Cali.
- Gallegos Casillas, P. A., Medina Nieto, D. B., & Pérez Pérez, K. D. (2015). *Secado*. Guanajuato.
- García, L. E., Mejía, M. F., Mejía, D. J., & Valencia, C. A. (2012). *Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos*. Bogotá, Colombia: Universidad de América.
- Guerrero Lemus, R. (2007). *Fundamentos de la Energía Solar, Universidad Ambiental de La Palma: Las energías alternativas, una apuesta de futuro en las islas*. Los Llanos de Aridane, España.
- Hinojosa, L. A. (2008). *Aprovechamiento de los Excedentes de Banano para la obtención de un Producto Tipo Bombón*. Guayaquil.
- Iberguy. (s.f.). *Ciclo higroscópico*. Recuperado el 28 de Marzo de 2020, de <https://www.ciclohigroscopico.com/compuestos-higroscopicos/>
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor (Cuarta Edición ed.)*. Mexico: Pearson Prentice Hall.

- Madriz Vargas, R., & Nandwani, S. (2011). *Mediciones de Transmisividad, Reflectividad y Absorbidad de algunos materiales para mejorar el aprovechamiento de la Energía Solar*.
- Masías, L. (2019). *Diseño de un secador solar directo de circulación natural tipo invernadero para cacao*.
- Mc Adam, W. C. (1954). *Heat transmission (3rd ed.)*. New York: McGraw-Hill.
- MINCETUR. (s.f.). *Perfil de frutas deshidratadas del mercado de Estados Unidos*. MINCETUR.
- Ministerio de agricultura y riego. (2018). *Situación comercial del banano orgánico en el mercado Europeo*. Lima.
- Myperuglobal. (21 de Mayo de 2019). *Myperuglobal*. Recuperado el 03 de Abril de 2020, de <https://myperuglobal.com/frutas-deshidratadas-un-producto-con-valor-agregado-con-un-crecimiento-del-49/>
- Nguyen Vu Lan. (2017). Improvement of conventional solar drying system. *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, (págs. 690-693). Ho Chi Minh.
- Obayopo, S., & Alonge, O. (2018). Development and Quality Analysis of a Direct Solar Dryer for Fish. *Scientific Research Publishing*, 474-488.
- Postolski, J. (1986). *Tecnología de congelación de los alimentos*. Zaragoza, España: ACRIBIA S.A.
- ProChile. (2011). *Estudio de mercado snacks de fruta deshidratada EEUU*. *Psicrometría*. (s.f.). Obtenido de <http://psicrometria-imi131.blogspot.mx/?view=classic>
- Salas Garita, C., Moya Rogue, R., & Cordoba Foglia, R. (2008). *Diseño y construcción de un secador solar para madera*.
- Sánchez, T. d. (2015). *Análisis de los mecanismos de transferencia de calor en un secador solar de alimentos*. Universidad Veracruzana, Tesis para obtener el grado de Maestría en ingeniería aplicada, Boca del Río, Veracruz.
- Speirs, C., & Coote, H. (1986). *Solar drying: Practical methods of food preservation*. Ginebra: ILO Publications.
- Swinbank, W. (1963). *Long-wave radiation from clear skies*. Q.J.R. Meteorol Soc.
- Tamayo Pereyra, R. (Octubre de 2011). *Ministerio de Energía y Minas*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <http://www.minem.gob.pe/>
- Tiwari, G. (2002). *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications*. New Delhi, India: Narosa Publishing House.

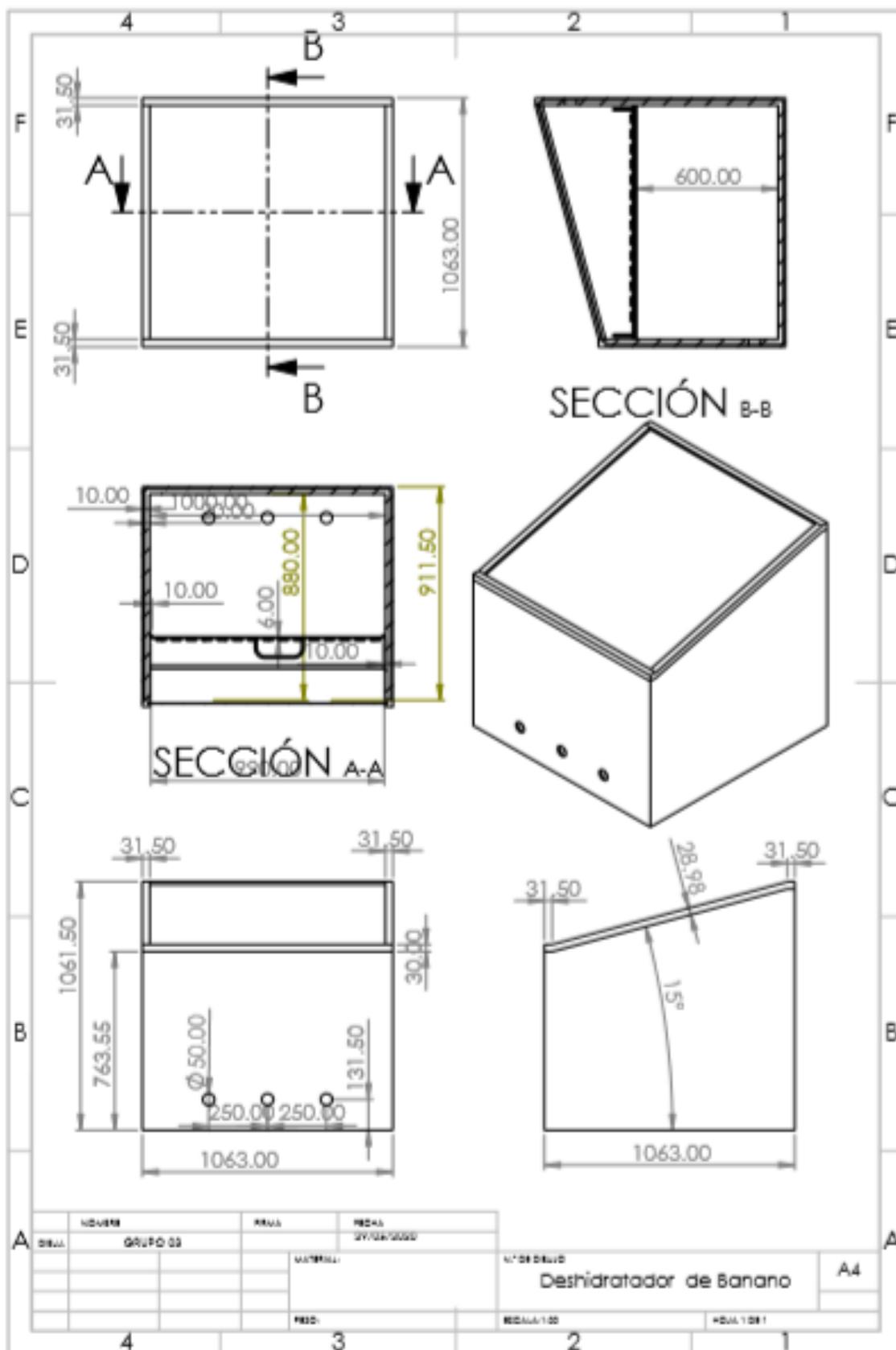
- Torres, S. (2012). *Guía práctica para el manejo de banano orgánico en el valle del Chira*. Piura: Hidalgo Impresores E.I.R.L.
- Umaña Cerros, E. (s.f.). *Conservación de alimentos por frío*. Fiagro. Obtenido de <https://issuu.com/eikoncrea/docs/conservacionaf/41>
- Uriol, J. (2016). *Estudio de colectores solares multipasos con y sin almacenamiento térmico en el secado de productos agrícolas*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica., Piura, Perú.
- Vega, T., Coronel, D., Timaná, C., Temoche, R., & Vargas, K. (2018). *Diseño del proceso de producción de snacks naturales con diferentes sabores para el banano orgánico deshidratado en la empresa agroindustrial Santa Isabel E.I.R.L*. Piura: Pirhua.
- Vilcarima, C. (2015). *Diseño de secador solar de piña y plátano automático*. Lima.
- Visavale, G. (2012). *Principles, Classification and Selection of Solar Dryers*.
- World Health Organization; Pan American Health Organization . (s.f.). *PAHO*. Obtenido de [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10838:2015-peligros-biologicos&Itemid=41432&lang=en#:~:text=La%20mayor%C3%ADa%20de%20las%20bacterias,45%C2%BAC%2F113%C2%B0F](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10838:2015-peligros-biologicos&Itemid=41432&lang=en#:~:text=La%20mayor%C3%ADa%20de%20las%20bacterias,45%C2%BAC%2F113%C2%B0F)).

## Apéndices

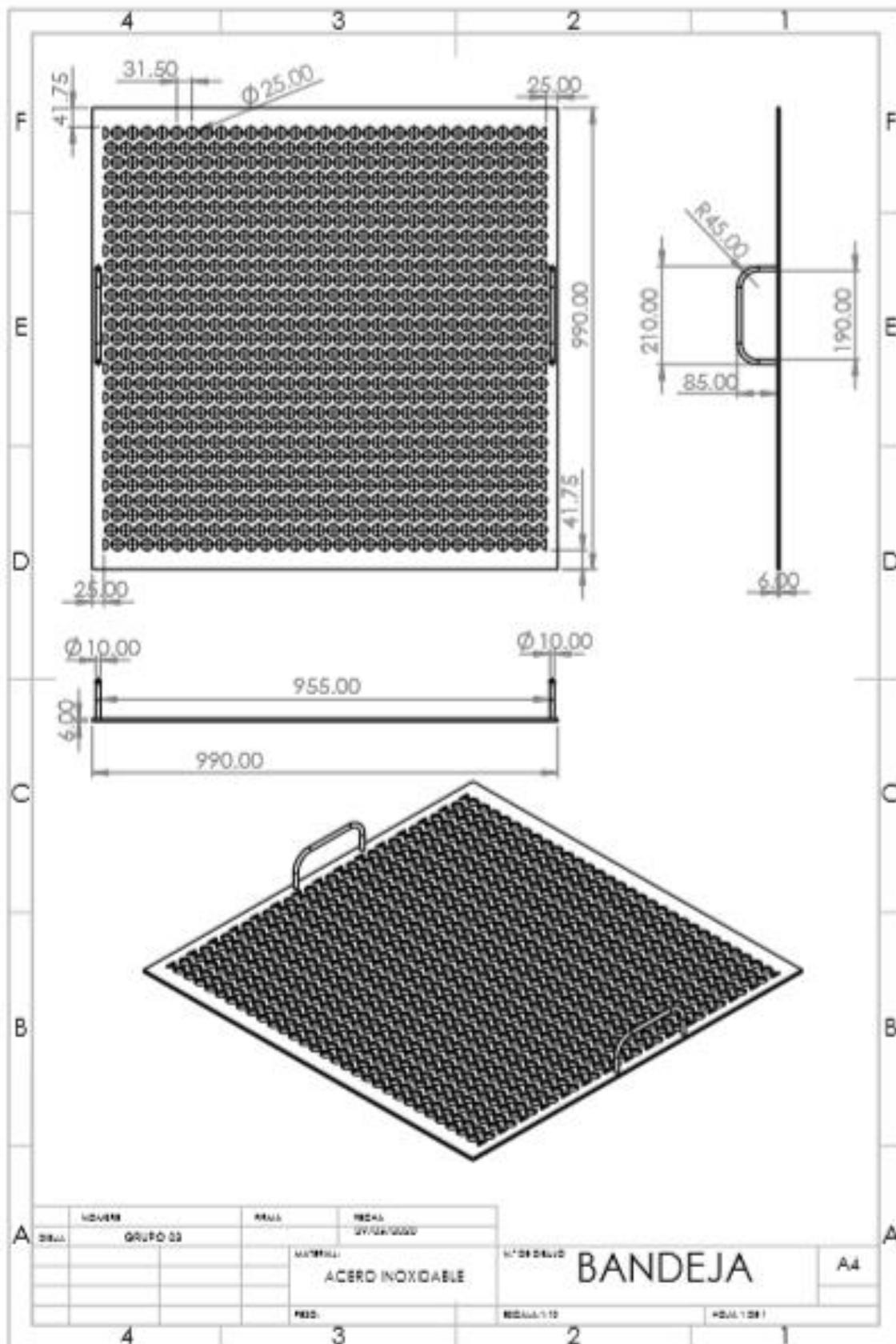




Apéndice A: Planos del deshidratador diseñado



Apéndice B: Planos de la placa absorbente



**Anexos**





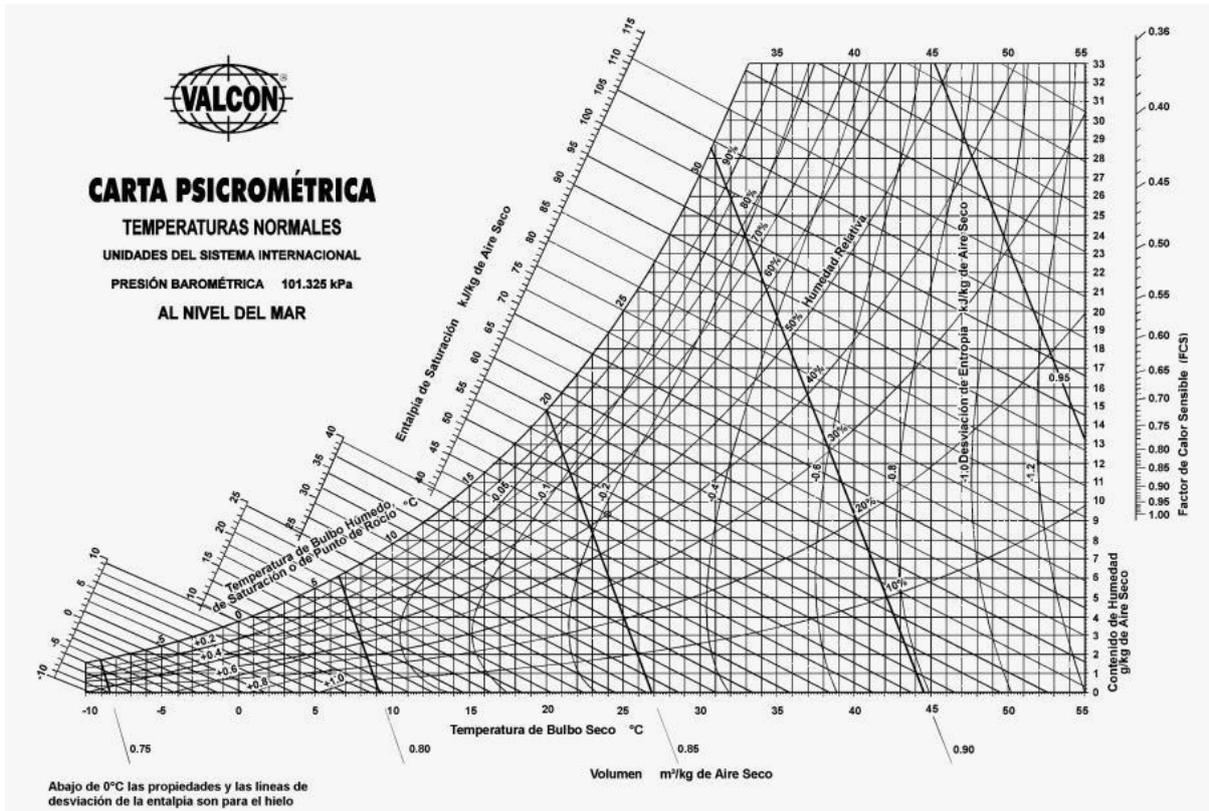
**Anexo A: Datos de estación meteorológica en Universidad de Piura**

| <b>Hora</b> | <b>Promedio de Temperatura °C</b> | <b>Promedio de radiación W/m<sup>2</sup></b> | <b>Promedio de velocidad del viento m/s</b> |
|-------------|-----------------------------------|--|---|
| 0           | 21,34356257                       | 0  | 0,909229711                                 |
| 1           | 21,08967593                       | 0  | 0,757301374                                 |
| 2           | 20,85836299                       | 0  | 0,677627902                                 |
| 3           | 20,64820554                       | 0  | 0,609174667                                 |
| 4           | 20,47368898                       | 0  | 0,586476681                                 |
| 5           | 20,325617                         | 0  | 0,558248421                                 |
| 6           | 20,2349697                        | 9,659122717                                  | 0,554643924                                 |
| 7           | 20,60032237                       | 99,72432796                                  | 0,760704152                                 |
| 8           | 21,56304521                       | 267,3352076                                  | 0,950392985                                 |
| 9           | 22,99693228                       | 470,1056878                                  | 1,004157173                                 |
| 10          | 24,68660778                       | 668,668063                                   | 1,031402863                                 |
| 11          | 26,43505184                       | 818,4701026                                  | 1,099361346                                 |
| 12          | 28,03461054                       | 867,5531277                                  | 1,215999211                                 |
| 13          | 29,28118098                       | 827,8910917                                  | 1,3818766                                   |
| 14          | 29,91280338                       | 689,269437                                   | 1,588556814                                 |
| 15          | 29,79210499                       | 516,1825503                                  | 1,846215118                                 |
| 16          | 28,8257065                        | 329,4074533                                  | 2,049919888                                 |
| 17          | 27,21337846                       | 144,0661472                                  | 2,05328405                                  |
| 18          | 25,37522924                       | 15,9140617                                   | 1,906960872                                 |
| 19          | 23,98669888                       | 0,001936124                                  | 1,861433798                                 |
| 20          | 23,02953234                       | 0  | 1,77542072                                  |
| 21          | 22,37946855                       | 0  | 1,562600486                                 |
| 22          | 21,94178998                       | 0  | 1,325975209                                 |
| 23          | 21,6198578                        | 0  | 1,104491701                                 |

*Nota:* Datos promedio de tomas cada 10 min desde el 1/01/2019 al 31/12/2019.

Fuente: Elaboración propia a partir de Centro Meteorológico de la Universidad de Piura.

## Anexo B: Carta psicrométrica



Fuente: (Psicrometría). Extraído de: <http://psicrometria-imi131.blogspot.mx/?view=classic>



**Anexo C: Datos SENAMHI**

| Diciembre del 2019 |      |                      | Noviembre del 2019 |      |                      | Octubre del 2019 |      |                      |
|--------------------|------|----------------------|--------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|
| Temperatura (°C)   |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C)   |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) |
| Máx.               | Mín. |                      | Máx.               | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      |
| 32                 | 21.4 | 74.5                 | 31.4               | 19.2 | 77.4                 | 26.6             | 17.2 | 80.8                 |
| 33.2               | 21.2 | 71.3                 | 30.8               | 19   | 74.3                 | 29.6             | 17   | 77.1                 |
| 33.8               | 21.4 | 75.7                 | 30.6               | 19.2 | 75.1                 | 30               | 17.8 | 75.8                 |
| 33.6               | 21.6 | 72.4                 | 31.8               | 19   | 77.9                 | 27.8             | 17   | 84.3                 |
| 33.8               | 22   | 69.3                 | 32.2               | 19.2 | 72.6                 | 28.8             | 17.6 | 77.2                 |
| 33                 | 21.8 | 74.9                 | 31.4               | 18.6 | 76.1                 | 30.2             | 17.2 | 72                   |
| 33.2               | 22   | 78.2                 | 32.2               | 18.6 | 75.9                 | 28.2             | 17   | 82.4                 |
| 31.4               | 20.8 | 71.8                 | 31.6               | 17.8 | 74.4                 | 26.8             | 17.2 | 79.9                 |
| 30.2               | 20   | 75.5                 | 32.2               | 18.6 | 75.1                 | 30.2             | 16.8 | 76.6                 |
| 29.8               | 19.8 | 82.3                 | 32                 | 19.6 | 77.1                 | 29.4             | 17.4 | 82.6                 |
| 31.4               | 21.6 | 79.3                 | 31.8               | 19.8 | 81.5                 | 28               | 17.2 | 81.9                 |
| 31.2               | 21.8 | 78.7                 | 29                 | 19.2 | 79.3                 | 30               | 15.6 | 74.9                 |
| 33.8               | 21   | 63.9                 | 30.4               | 19.6 | 81.3                 | 30.2             | 16.8 | 79.1                 |
| 31                 | 21.4 | 78.2                 | 31.8               | 19.8 | 77.5                 | 31               | 15.8 | 72.1                 |
| 32.8               | 19.8 | 74.2                 | 30.8               | 19   | 75.8                 | 31.6             | 18   | 79.5                 |
| 33                 | 20.8 | 71.2                 | 28.8               | 19.6 | 80.4                 | 30.6             | 18.8 | 74.2                 |
| 32.2               | 20.2 | 74.5                 | 29.2               | 19.4 | 78.1                 | 30.2             | 18.8 | 75.5                 |
| 33.2               | 21.6 | 74.8                 | 27.4               | 19.6 | 83.3                 | 30.2             | 19   | 81                   |
| 32.2               | 21.8 | 74.7                 | 29.2               | 19.2 | 85.3                 | 31.6             | 18.6 | 79.2                 |
| 32.6               | 21   | 71.6                 | 32                 | 18.6 | 83.5                 | 29               | 18.2 | 83.8                 |
| 34                 | 21.2 | 70.3                 | 30.2               | 20.4 | S/D                  | 30.6             | 18.6 | 79.8                 |
| 34.2               | 22.6 | 73.6                 | 30.8               | 20.8 | 78                   | 30               | 18.2 | 79                   |
| 34.4               | 21.6 | 68.2                 | 26.8               | 18.6 | 82.4                 | 30.2             | 17.8 | 78.4                 |
| 34.8               | 21.2 | 69.2                 | 27.8               | 20.2 | 81.9                 | 30               | 18   | 77                   |
| 33.2               | 21   | 75.6                 | 25.6               | 20   | 91.3                 | 30.8             | 18.2 | 78                   |
| 34.2               | 20.8 | 69.8                 | 31                 | 20.2 | 77.5                 | 31.2             | 17.4 | 70.9                 |
| 34.4               | 22   | 74.2                 | 33                 | 20.2 | 76.6                 | 31.4             | 16.6 | 73.9                 |
| 35.6               | 22.6 | 73.2                 | 32.8               | 20   | 74.6                 | 30               | 18.2 | 78                   |
| 32.2               | 21.2 | 81.3                 | 33.2               | 21.2 | 78.7                 | 29.2             | 18.4 | 75.2                 |
| 33.2               | 23   | 69.2                 | 29                 | 20.8 | 87.5                 | 31.2             | 17.2 | 71.6                 |
| 35                 | 22.6 | 76.1                 |                    |      |                      | 33.4             | 19   | 73.6                 |

| Septiembre del 2019 |      |                      | Agosto del 2019  |      |                      | Julio del 2019   |      |                      |
|---------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|
| Temperatura (°C)    |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) |
| Máx.                | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      |
| 27                  | 18   | 82.8                 | 27.6             | 14   | 74.3                 | 30               | 17.8 | 83.6                 |
| 29.4                | 17.8 | 81.4                 | 28.8             | 15.6 | 79.9                 | 29.2             | 19.2 | 82.4                 |
| 30.8                | 16.8 | 78.2                 | 27.2             | 15   | 78.7                 | 28.8             | 18   | 78.9                 |
| 29.4                | 17.8 | 78.9                 | 28.8             | 17   | S/D                  | 28.2             | 17.4 | 84.2                 |
| 30.8                | 17.2 | 71.9                 | 29.2             | 16   | 76.9                 | 29.2             | 18.2 | 73                   |
| 30.8                | 16.8 | 77.7                 | 27.2             | 16.6 | 79.2                 | 30.2             | 18   | 79.8                 |
| 29                  | 18   | 78.2                 | 26.2             | 16   | 82.5                 | 29.2             | 18.4 | 80.4                 |
| 26.4                | 17.6 | 84.8                 | 26.2             | 16.8 | 78.8                 | 29               | 17   | 78.6                 |
| 26.2                | 16.8 | 80                   | 26.8             | 16.2 | 83                   | 27.6             | 17.2 | 80.6                 |
| 28.2                | 16.6 | 79.1                 | 27               | 16.8 | 83                   | 28.2             | 15.6 | 80.6                 |
| 28.6                | 15.6 | 78.3                 | 27.8             | 16   | 82.9                 | 28.6             | 15.8 | 78.2                 |
| 28.4                | 17.2 | 80.6                 | 27               | 15.8 | 79.5                 | 27.8             | 18.6 | 83.5                 |
| 29                  | 17.4 | 77.6                 | 29               | 15   | 72.8                 | 29.2             | 18.4 | 80.8                 |
| 29.2                | 17   | 78.1                 | 24.2             | 17.6 | 89                   | 27.8             | 17.8 | 80.6                 |
| 29.4                | 17.2 | 76.3                 | 29.8             | 17.8 | 80.8                 | 29.2             | 17.4 | 75.6                 |
| 28.4                | 16.8 | 76.6                 | 28               | 17.8 | 85.6                 | 30.2             | 18   | 77.3                 |
| 30.2                | 17   | 75.7                 | 28.2             | 17.2 | 81.8                 | 28               | 17.8 | 83.6                 |
| 27                  | 17.2 | S/D                  | 26.2             | 16.8 | 86.5                 | 27               | 18   | 83.5                 |
| 29.2                | 17.8 | S/D                  | 27.8             | 17   | 78.6                 | 28.6             | 16   | 78.5                 |
| 25.2                | 16.8 | 86.2                 | 30.2             | 16   | 74.7                 | 29.8             | 14.8 | 74.6                 |
| 30.2                | 17.2 | 77.9                 | 31.8             | 16.2 | 74.6                 | 29.6             | 17.2 | 77.6                 |
| 29.6                | 17.6 | 76.8                 | 28               | 17.8 | 83.1                 | 29.2             | 17   | 79                   |
| 25.8                | 18   | 86.3                 | 30.2             | 17.2 | 82                   | 29.8             | 18   | 78                   |
| 28.8                | 17   | 79.1                 | 27.4             | 17   | 80.1                 | 30.6             | 17.8 | 78                   |
| 30                  | 17.2 | 82.6                 | 27.8             | 16   | 76.1                 | 26               | 17.6 | 86                   |
| 30.6                | 16.4 | 80.9                 | 28.2             | 16.2 | 82.1                 | 26.6             | 16.8 | 84.7                 |
| 31.4                | 16.8 | 76.8                 | 29.4             | 16.8 | 79.9                 | 28               | 16.2 | 78.6                 |
| 30.6                | 17.4 | 77.1                 | 28.6             | 17.4 | 77.2                 | 25.2             | 16   | 82.3                 |
| 31.6                | 17.8 | 79.6                 | 31.2             | 15.2 | 78.4                 | 25.4             | 16   | 84.7                 |
| 29.2                | 17.8 | 82.5                 | 30               | 18.2 | 84                   | 27               | 15.4 | 80                   |
|                     |      |                      | 29.4             | 18   | 78.2                 | 28.8             | 12.2 | 74.3                 |

| Junio del 2019   |      |                      | Mayo del 2019    |      |                      | Abril del 2019   |      |                      |
|------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|
| Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) |
| Máx.             | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      |
| 31.4             | 20.8 | 75.9                 | 32.8             | 20.8 | 75.9                 | 34.2             | 21.8 | 68.8                 |
| 30.4             | 19.8 | 74.6                 | 32.8             | 21   | 72.9                 | 33.2             | 22.2 | 68.3                 |
| 30.2             | 18.2 | 76.7                 | 33.4             | 22.8 | 71.3                 | 35.8             | 23.8 | 68.1                 |
| 31               | 19   | 74.6                 | 34.4             | 22.8 | 69.2                 | 35.8             | 22   | 62.8                 |
| 30.4             | 18.2 | 79.8                 | 33.4             | 21.8 | 65.8                 | 36.2             | 21.8 | 62.7                 |
| 32               | 19.6 | 74.4                 | 33.6             | 22.6 | 78.6                 | 35.8             | 22.2 | 60.2                 |
| 32.2             | 19.4 | 76.3                 | 31.4             | 22.8 | 74.8                 | 35               | 20.8 | 59.7                 |
| 31.4             | 19.8 | 74.6                 | 32.6             | 21.6 | 74.5                 | 34.6             | 23   | 67.6                 |
| 31.6             | 19.2 | 77.7                 | 32.6             | 21.6 | 81.5                 | 35.2             | 22.8 | 69.6                 |
| 30.8             | 20.6 | 77.5                 | 33               | 22   | 74.2                 | 33.4             | 22   | 66                   |
| 31.2             | 20   | 73.9                 | 34.2             | 20.8 | 73.9                 | 35               | 21.8 | 64.8                 |
| 31               | 19.2 | 75.3                 | 33.2             | 21.8 | 68.4                 | 34.2             | 20.8 | 63.5                 |
| 29.8             | 18.2 | 78.7                 | 32.6             | 23   | 72.4                 | 34.4             | 21.2 | 61.5                 |
| 29.8             | 18   | 75.7                 | 33.6             | 22.2 | 75.6                 | 34               | 21.6 | 60.9                 |
| 30.2             | 19.6 | 75.6                 | 33.4             | 22   | 76.9                 | 35               | 22.4 | 63.4                 |
| 29.6             | 19.2 | 82.2                 | 33               | 21.8 | 78.7                 | 34.4             | 21.2 | 65.5                 |
| 28.8             | 19   | 83.5                 | 33               | 21   | 76.7                 | 33.2             | 22   | 66.1                 |
| 29               | 18.8 | 78.7                 | 32.4             | 20.8 | 77.6                 | 35               | 22.2 | 63                   |
| 28.6             | 18   | S/D                  | 33.2             | 19.8 | 74.9                 | 33.2             | 23   | 67.4                 |
| 27.6             | 20   | 84.3                 | 30.6             | 20.8 | 78.1                 | 34.2             | 21.8 | 66.8                 |
| 28.4             | 18.8 | 84.8                 | 31               | 19.8 | 80.9                 | 34.2             | 23   | 66.2                 |
| 28.2             | 17.6 | 82.4                 | 30.6             | 20.4 | 77                   | 33.4             | 23.6 | 67.8                 |
| 30               | 19.6 | 77.2                 | 30.4             | 19.2 | 75.7                 | 34               | 24   | 63.9                 |
| 31.2             | 18.6 | 74.8                 | 30               | 20.2 | 76.9                 | 34.2             | 23.4 | 66.7                 |
| 29.2             | 18.4 | 74.5                 | 32.8             | 21.6 | 74.4                 | 34.4             | 23   | 73.3                 |
| 29.4             | 18.8 | 73.3                 | 32.2             | 21.4 | 73.1                 | 33.6             | 21.8 | 72.7                 |
| 30.8             | 17.8 | 76.6                 | 30.6             | 20.4 | 77.3                 | 32.4             | 21.8 | 77.3                 |
| 30.6             | 17.8 | 80                   | 31.4             | 20   | 73.4                 | 33.4             | 22   | 71.3                 |
| 27.6             | 19.8 | 82.3                 | 27.8             | 20.4 | 86.2                 | 33.6             | 21.6 | 71                   |
| 28.4             | 18.8 | 80.2                 | 28.8             | 20   | 82.6                 | 33.4             | 21   | 71.3                 |
|                  |      |                      | 31.2             | 19.8 | 73.5                 |                  |      |                      |

| Marzo del 2019   |      |                      | Febrero del 2019 |      |                      | Enero del 2019   |      |                      |
|------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|------------------|------|----------------------|
| Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) | Temperatura (°C) |      | Humedad relativa (%) |
| Máx.             | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      | Máx.             | Mín. |                      |
| 36.8             | 25   | 62.5                 | 36.2             | 24.2 | 71.6                 | 34.6             | 21.8 | 69.4                 |
| 35.6             | 23.2 | 67                   | 33.8             | 25.6 | 77.8                 | 34.6             | 21.8 | 68.8                 |
| 36               | 24.8 | 66.8                 | 34               | 25.2 | 74.6                 | 35.2             | 23   | 71                   |
| 35.8             | 24.4 | 65                   | 34.2             | 25   | 69.1                 | 37.2             | 23.4 | 66.1                 |
| 37.4             | 25.4 | 65.5                 | 37.4             | 24.2 | 66.5                 | 35.2             | 23   | 82.4                 |
| 36.2             | 25.2 | 68.2                 | 34.8             | 26.6 | 72.1                 | 33.2             | 24.8 | 72                   |
| 35               | 23.8 | 65.5                 | 32.4             | 24.6 | 72.7                 | 35.2             | 23.8 | 73.5                 |
| 36.8             | 22.8 | 61.1                 | 33               | 23.8 | 79.3                 | 35.4             | 24.8 | 75.3                 |
| 36.4             | 23.8 | 61.2                 | 33.6             | 23.6 | 77.3                 | 35               | 24.8 | 74                   |
| 36.8             | 24   | 59.6                 | 32.2             | 24   | 70.1                 | 33.2             | 25   | 77.9                 |
| 38               | 25.2 | 60.9                 | 34.6             | 23   | 69.9                 | 35.2             | 24.8 | 71.1                 |
| 37.2             | 25.2 | 63                   | 33.4             | 24.6 | 68.7                 | 35               | 23.8 | 71.1                 |
| 37               | 24.8 | 61.7                 | 37               | 24.2 | 64.4                 | 34.8             | 23.2 | 71.9                 |
| 36.2             | 23.8 | 65.5                 | 33.2             | 25   | 78.7                 | 31               | 22.8 | 78.5                 |
| 37.2             | 24   | 60.6                 | 34.2             | 24   | 81.5                 | 31.8             | 24   | 72.7                 |
| 36               | 24.2 | 62.2                 | 37               | 24.8 | 64.9                 | 36.2             | 23.4 | 67.5                 |
| 36.4             | 24.2 | 61.7                 | 37               | 24.6 | 65.5                 | 34.2             | 22.6 | 65.6                 |
| 36               | 22.6 | 63.7                 | 32.2             | 24.8 | 83.1                 | 33.6             | 22.8 | 67.4                 |
| 35.2             | 23.2 | 59.2                 | 33.6             | 23.2 | 82.4                 | 35.6             | 23.2 | 65.5                 |
| 31.8             | 23.2 | 62.9                 | 36               | 23.8 | 66.1                 | 34.4             | 23.8 | 72.9                 |
| 35.8             | 22   | 63.6                 | 36.2             | 23.8 | 63                   | 35.6             | 24   | 66.3                 |
| 37.6             | 23.2 | 59.9                 | 36.4             | 24.2 | 61.1                 | 34.2             | 24.8 | 66.6                 |
| 34.8             | 23   | 60.5                 | 35               | 25.2 | 68                   | 37               | 25   | 60.1                 |
| 35.4             | 22.8 | 61.7                 | 34               | 24   | 69.6                 | 35               | 22.8 | 66.6                 |
| 36.2             | 22.8 | 63.3                 | 36.2             | 24   | 66.1                 | 36.8             | 22.4 | 65.1                 |
| 35               | 23.4 | 64.4                 | 37               | 24.8 | 60.7                 | 36.4             | 24.8 | 65.6                 |
| 34.2             | 22.4 | 64.5                 | 36.4             | 25   | 64.8                 | 38               | 25   | 68.3                 |
| 35.8             | 22.6 | 64.2                 | 35.2             | 23.8 | 65.3                 | 33.2             | 26.2 | 68.2                 |
| 33.8             | 22.8 | 67                   |                  |      |                      | 36.2             | 23   | 69.4                 |
| 33.2             | 24.2 | 67.7                 |                  |      |                      | 36.8             | 25.6 | 64.6                 |
| 35.2             | 21.2 | 63.8                 |                  |      |                      | 33.2             | 25.8 | 77.2                 |

Fuente: Centro Meteorológico de la Universidad de Piura.