



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
SECADOR SOLAR PARA EL CAPSICUM ANNUM (AJÍ) CON  
COLECTOR-ALMACENADOR EN LECHO DE ROCAS CON  
UNA CAPACIDAD DE 25 kg**

**DE LA TORRE MORENO JOSÉ LUIS**

**PORTILLA HERRERA MAYRA ALEJANDRA**

**DIRECTOR: INGENIERO OSWALDO MARIÑO**

**CODIRECTOR: INGENIERO XAVIER RODRÍGUEZ**

**SANGOLQUÍ 2015**

## CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA EL CAPSICUM ANNUM (AJÍ) CON COLECTOR-ALMACENADOR EN LECHO DE ROCAS CON UNA CAPACIDAD DE 25 KG”, fue realizado en su totalidad por JOSÉ LUIS DE LA TORRE MORENO y MAYRA ALEJANDRA PORTILLA HERRERA, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.



---

Ingeniero Oswaldo Mariño  
DIRECTOR



---

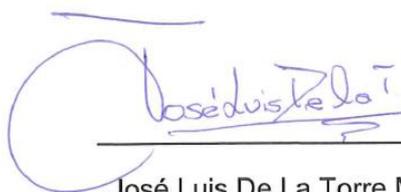
Ingeniero Xavier Rodríguez  
CODIRECTOR

Sangolquí, Agosto del 2015

## LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA EL CAPSICUM ANNUM (AJÍ) CON COLECTOR-ALMACENADOR EN LECHO DE ROCAS CON UNA CAPACIDAD DE 25 KG”.

### ELABORADO POR:



---

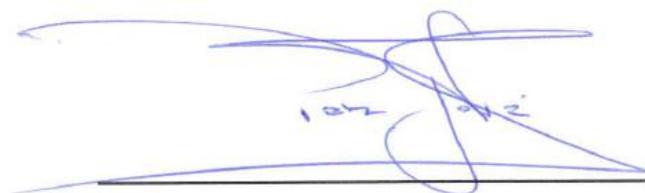
José Luis De La Torre Moreno



---

Mayra Alejandra Portilla Herrera

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA:



---

Ing. José Pérez R.

Sangolquí, Agosto de 2015

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

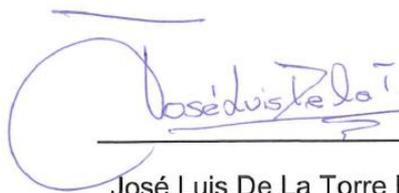
Nosotros, JOSÉ LUIS DE LA TORRE MORENO y MAYRA ALEJANDRA  
PORTILLA HERRERA

### DECLARAMOS QUE:

La tesis/ proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA EL CAPSICUM ANNUM (AJÍ) CON COLECTOR-ALMACENADOR EN LECHO DE ROCAS CON UNA CAPACIDAD DE 25 KG”, ha sido desarrollada con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de tercero y conforme a las citas cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud a esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.



---

José Luis De La Torre Moreno



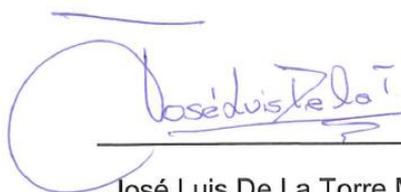
---

Mayra Alejandra Portilla Herrera

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, JOSÉ LUIS DE LA TORRE MORENO y MAYRA ALEJANDRA  
PORTILLA HERRERA

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA EL CAPSICUM ANNUM (AJÍ) CON COLECTOR-ALMACENADOR EN LECHO DE ROCAS CON UNA CAPACIDAD DE 25 KG”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



---

José Luis De La Torre Moreno



---

Mayra Alejandra Portilla Herrera

Sangolquí, Agosto de 2015

## DEDICATORIA

*El presente trabajo lo dedico a mis padres José Luis y Lorena que han sido mi apoyo y sostén en los momentos más difíciles que gracias a su cariño, comprensión y apoyo hoy puedo terminar esta etapa de mi vida con éxito, todos se los debo a ellos.*

*A mis hermanos Rubens y Crysthell que han sido mis confidentes, amigos y cómplices, en los momentos que más necesite de ellos acudieron a mi ayuda sin importar el lugar ni momento que los requerí y los cuales son mi mayor orgullo.*

*De igual manera a mis abuelitos Germán y Noemí que son como mis segundos padres que han sabido darme sus consejos y apoyo cuando se los pedí y lo necesite, a toda mi familia que son el pilar del cual me apoye.*

*Finalmente se lo dedico a mis amigos y compañeros que durante mi vida universitaria compartieron en las aulas buenos y malos momentos junto a mí, de los cuales me llevo solo gratos recuerdos y anécdotas vividas.*

*José Luis De La Torre Moreno*

## DEDICATORIA

*A mis padres, que son la fuente de luz, esperanza y ejemplo en mi vida.*

*A mi hermano, que es la base de liderazgo y perseverancia.*

*A mis abuelitos, que son las huellas que dejan un camino lleno de enseñanzas y sueños por cumplir.*

*A mis familiares, que son mi apoyo incondicional.*

*A mis amigos, que son el complemento de la vida.*

*A mis maestros, que son muestra de enseñanza.*

*A las futuras generaciones, que son lucha por un mundo mejor.*

*Mayra Alejandra Portilla Herrera*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a Dios y a la Virgen del Cisne por permitirme culminar esta carrera sin contratiempos. A mi familia que con su apoyo y esfuerzo me dieron todas las herramientas necesarias para cumplir con esta meta que me propuse.*

*Al señor Ing. Ángel Portilla por contribuir con sus consejos y experiencia a este trabajo.*

*A mi compañera de tesis Mayra Portilla que confió en mí para la realización de este proyecto, la cual me brindó su amistad sincera y apoyo incondicional durante todo este tiempo.*

*A mi director y codirector de tesis Ing. Oswaldo Mariño y Ing. Xavier Rodríguez respectivamente, por su orientación y exigencia.*

*José Luis De La Torre Moreno*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios y a la Virgen Santísima, por haber estado junto a mí a lo largo de la carrera de Ingeniería Mecánica, siendo los pilares fundamentales en mi vida.*

*A mi madre Miriam Herrera, por su amor, comprensión, ejemplo y sobre todo por su sacrificio que permitió cumplir con este objetivo, igualmente por haberme inculcado la importancia de superación.*

*A mi padre Ángel Portilla, por su amor, apoyo y sobre todo por su esfuerzo constante para que cada día sea mejor, por confiar siempre en mí, por haber sido mi compañero a lo largo de este proceso, no solo como padre sino como maestro compartiendo sus conocimientos y experiencias.*

*A mi hermano, por ser el empuje necesario para seguir adelante, con su cariño y ocurrencias que alegran mi vida, además por ser la persona con la cual siempre puedo contar y apoyarme.*

*A José Luis De La Torre, por ser mi compañero de tesis y más que eso por ser mi amigo, quién me brindó su apoyo y se esforzó para cumplir con esta meta, gracias a su paciencia, tolerancia, conocimientos y a sus consejos, además de enseñarme cual es el verdadero significado de la amistad y por todos los momentos que compartimos.*

*A todos mis familiares, abuelitos, tíos y primos que con su colaboración y oraciones estuvieron pendientes a lo largo de esta carrera.*

*A los ingenieros Oswaldo Mariño y Xavier Rodríguez, por su colaboración con sus conocimientos y por exigir la realización de un buen proyecto, además de proporcionar materiales acordes a nuestra tesis y sobre todo por esa ayuda desinteresada.*

*A todos y cada uno de mis amigos, compañeros y profesores que contribuyeron a mi formación y a la culminación de este trabajo.*

*Mayra Alejandra Portilla Herrera*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |       |
|--|-------|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO ..... | ii    |
| LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO .....                    | iii   |
| DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....               | iv    |
| AUTORIZACIÓN.....                                  | v     |
| DEDICATORIA .....                                  | vi    |
| DEDICATORIA .....                                  | vii   |
| AGRADECIMIENTO .....                               | viii  |
| AGRADECIMIENTO .....                               | ix    |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                         | xi    |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                             | xvi   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                             | xx    |
| NOMENCLATURA.....                                  | xxiv  |
| RESUMEN.....                                       | xxx   |
| ABSTRACT .....                                     | xxxii |
| CAPÍTULO 1.....                                    | 1     |
| GENERALIDADES .....                                | 1     |
| 1.1 ANTECEDENTES.....                              | 1     |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....                   | 6     |
| 1.3 OBJETIVO GENERAL .....                         | 6     |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                    | 7     |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN .....                            | 7     |
| 1.6 ALCANCE DEL PROYECTO .....                     | 9     |
| CAPÍTULO 2.....                                    | 10    |
| MARCO TEÓRICO .....                                | 10    |
| 2.1 CAPSICUM ANNUM (AJÍ).....                      | 10    |
| 2.1.1 ORIGEN DEL CAPSICUM ANNUM .....              | 10    |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.1.2   | CARACTERÍSTICAS DEL CAPSICUM ANNUM .....             | 10 |
| 2.1.2.1 | CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.....                        | 11 |
| 2.1.2.2 | DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL CAPSICUM ANNUM.....         | 11 |
| 2.1.2.3 | VALOR NUTRICIONAL.....                               | 12 |
| 2.1.3   | CLIMA Y TEMPERATURA DE CULTIVO.....                  | 13 |
| 2.1.4   | CULTIVO Y COSECHA.....                               | 13 |
| 2.1.5   | HUMEDAD.....   | 14 |
| 2.1.6   | PRODUCCIÓN DEL AJÍ EN EL ECUADOR.....                | 14 |
| 2.1.7   | CAPSAICINA .....                                     | 15 |
| 2.1.8   | USOS DEL CAPSICUM ANNUM .....                        | 16 |
| 2.1.9   | MÉTODOS DE CONSERVACIÓN DEL CAPSICUM ANNUM .....     | 16 |
| 2.2     | SECADO DE ALIMENTOS .....                            | 17 |
| 2.2.1   | PROCESO DE SECADO .....                              | 17 |
| 2.2.1.1 | PERIODOS DE SECADO .....                             | 18 |
| 2.2.2   | VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SECADO ..... | 19 |
| 2.2.2.1 | CONDICIONES AMBIENTALES .....                        | 19 |
| 2.2.2.2 | CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO .....                   | 20 |
| 2.2.2.3 | COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....          | 21 |
| 2.2.2.4 | ENERGÍA NECESARIA PARA EL SECADO.....                | 22 |
| 2.2.3   | CLASIFICACIÓN DE SECADORES DE ALIMENTOS .....        | 23 |
| 2.2.3.1 | SECADORES DIRECTOS O CONVECTIVOS.....                | 23 |
| 2.2.3.2 | SECADORES POR CONDUCCIÓN O INDIRECTOS .....          | 27 |
| 2.3     | RADIACIÓN SOLAR .....                                | 29 |
| 2.3.1   | GEOMETRÍA SOLAR.....                                 | 31 |
| 2.4     | PROPIEDADES DE RADIACIÓN.....                        | 32 |
| 2.4.1   | EMISIVIDAD .....                                     | 32 |
| 2.4.2   | ABSORTIVIDAD .....                                   | 33 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.4.3   | TRASMITANCIA Y REFLECTANCIA.....                                  | 33 |
| 2.5     | ENERGÍA SOLAR EN EL ECUADOR.....                                  | 33 |
| 2.6     | RADIACIÓN SOLAR Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS<br>DEL CABUYAL ..... | 36 |
| 2.7     | COLECTOR SOLAR PLANO .....  | 37 |
| 2.8     | ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....                                    | 39 |
| 2.9     | NUMÉRO DE BIOT.....   | 40 |
| 2.10    | CONVECCIÓN NATURAL .....  | 41 |
| 2.11    | CONVECCIÓN FORZADA.....   | 41 |
|         | CAPÍTULO 3.....   | 42 |
|         | DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO .....                   | 42 |
| 3.1     | DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO .....                               | 42 |
| 3.1.1   | PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO.....                  | 42 |
| 3.1.2   | DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO Y<br>BANDEJAS .....       | 43 |
| 3.1.3   | TIEMPO DE SECADO .....  | 49 |
| 3.1.4   | CALOR MÍNIMO REQUERIDO PARA EL SECADO DEL AJÍ .....               | 55 |
| 3.1.4.1 | CALOR NECESARIO PARA CALENTAR LA MASA DE AJÍ .....                | 55 |
| 3.1.4.2 | CALOR SENSIBLE DEL AGUA .....                                     | 56 |
| 3.1.4.3 | CALOR REMANENTE .....   | 60 |
| 3.1.4.4 | CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN .....                               | 61 |
| 3.1.4.5 | PÉRDIDAS DE CALOR DESDE LA CÁMARA DE SECADO .....                 | 62 |
| 3.2     | DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL COLECTOR SOLAR .....                      | 69 |
| 3.2.1   | PARÁMETROS DE DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR.....                      | 69 |
| 3.2.2   | CAUDAL MÁXIMO DE AIRE .....                                       | 69 |
| 3.2.3   | MODELO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR .....                        | 73 |
| 3.2.3.1 | MODELO MATEMÁTICO PARA EL AIRE.....                               | 74 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 3.2.3.2 | MODELO MATEMÁTICO PARA EL LECHO DE ROCAS .....  | 76  |
| 3.2.4   | DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR-ALMACENADOR.....  | 78  |
| 3.2.4.1 | LONGITUD DEL COLECTOR.....  | 78  |
| 3.2.4.2 | COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....                                    | 80  |
| 3.2.5   | EFICIENCIA TÉRMICA DEL COLECTOR.....  | 94  |
| 3.2.6   | NÚMERO DE BIOT .....  | 95  |
| 3.2.7   | TIEMPO REQUERIDO PARA LLEGAR A LA TEMPERATURA<br>DE FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR ..... | 96  |
| 3.2.8   | ENERGÍA ALMACENADA EN EL LECHO DE ROCAS.....  | 97  |
| 3.2.9   | ORIENTACIÓN DEL COLECTOR-ALMACENADOR .....  | 100 |
| 3.2.10  | EFICIENCIA DEL SECADOR.....   | 103 |
| 3.2.11  | EFICIENCIA DEL SISTEMA.....   | 104 |
| 3.2.12  | CAÍDAS DE PRESIÓN EN EL SISTEMA DE SECADO<br>INDIRECTO .....                          | 104 |
| 3.2.13  | SEPARACIÓN DE LA CHIMENEA AL SOMBRERETE.....  | 114 |
| 3.3     | DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE SECADO .....                                   | 114 |
| 3.3.1   | ESTRUCTURA DEL SOPORTE DEL COLECTOR.....  | 115 |
| 3.3.2   | ESTRUCTURA DE LA CÁMARA DE SECADO.....  | 122 |
|         | CAPÍTULO 4.....   | 124 |
|         | CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS .....  | 124 |
| 4.1     | PLANOS DEL SISTEMA DE SECADO .....  | 124 |
| 4.2     | CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO.....   | 124 |
| 4.2.1   | CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR-ALMACENADOR .....   | 124 |
| 4.2.2   | CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE SECADO.....  | 129 |
| 4.3     | INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO .....   | 133 |
| 4.4     | INSTRUMENTACIÓN .....   | 133 |
| 4.5     | ADQUISICIÓN DE DATOS .....  | 136 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.6     | PRUEBAS Y RECOPIACIÓN DE DATOS.....                 | 138 |
| 4.6.1   | PROTOCOLO DE PRUEBAS .....                          | 138 |
| 4.6.1.1 | METODOLOGÍA DE PRUEBAS.....                         | 138 |
| 4.6.1.2 | INTERVALO DE MEDICIÓN .....                         | 139 |
| 4.6.1.3 | UBICACIÓN DE LOS SENSORES.....                      | 140 |
| 4.6.1.4 | PREPARACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO .....             | 140 |
| 4.6.1.5 | PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE AJÍ.....               | 141 |
| 4.6.2   | PARÁMETROS DE EVALUACIÓN .....                      | 141 |
| 4.6.2.1 | VARIABLES DEL COLECTOR-ALMACENADOR .....            | 141 |
| 4.6.2.2 | VARIABLES DE LA CÁMARA DE SECADO .....              | 142 |
| 4.6.3   | RESULTADOS.....                                     | 143 |
| 4.7     | ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                        | 151 |
| 4.7.1   | ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA EN VACIO .....  | 151 |
| 4.7.2   | ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA CON CARGA ..... | 156 |
|         | CAPÍTULO 5.....                                     | 162 |
|         | ANÁLISIS DE COSTOS DEL SECADOR .....                | 162 |
| 5.1     | COSTOS DIRECTOS.....                                | 162 |
| 5.2     | COSTOS INDIRECTOS .....                             | 166 |
| 5.3     | ANÁLISIS DE COSTOS .....                            | 168 |
|         | CAPITULO 6.....                                     | 169 |
|         | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                | 169 |
| 6.1     | CONCLUSIONES .....                                  | 169 |
| 6.2     | RECOMENDACIONES .....                               | 171 |
|         | BIBLIOGRAFÍA.....                                   | 172 |
|         | ANEXOS .....  | 181 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabla 1.  | Lista de materiales sólidos-líquidos usuales para el almacenamiento de calor sensible .....  | 3   |
| Tabla 2.  | Taxonomía del Capsicum Annum.....  | 11  |
| Tabla 3.  | Valor nutricional del capsicum annum por cada 100 mg.....  | 12  |
| Tabla 4.  | Escala de Scoville para diferentes tipos de capsicum .....   | 15  |
| Tabla 5.  | Ventajas y desventajas de los tipos de secadores solares .....   | 27  |
| Tabla 6.  | Ubicación de la Comunidad del Cabuyal .....  | 36  |
| Tabla 7.  | Condiciones meteorológicas de superficie e insolación para el Cabuyal .....  | 36  |
| Tabla 8.  | Matriz de pesos ponderados para el espesor del lecho .....   | 46  |
| Tabla 9.  | Dimensiones generales de la cámara de secado .....   | 49  |
| Tabla 10. | Resultados de las iteraciones del tiempo de secado .....   | 54  |
| Tabla 11. | Matriz de selección para el aislante térmico .....   | 63  |
| Tabla 12. | Pérdidas de calor en función de $L_e$ .....  | 67  |
| Tabla 13. | Parámetros psicométricos .....   | 71  |
| Tabla 14. | Resultados del proceso psicométrico del aire.....  | 72  |
| Tabla 15. | Dimensiones del colector .....   | 93  |
| Tabla 16. | Resultados del modelo matemático.....  | 94  |
| Tabla 17. | Conversión de cualquier fecha para un número ordinario de 1 al 365 con valores calculados para el día promedio de cada mes y declinación solar ..... | 101 |
| Tabla 18. | Ángulo de inclinación del colector para cada día típico para una latitud de $0.58^\circ$ .....   | 102 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabla 19. | Dimensiones del colector-almacenador .....   | 103 |
| Tabla 20. | Matriz de pesos ponderados para la selección del material para la estructura ..... | 114 |
| Tabla 21. | Cargas a las cuales está sometido el soporte del colector ....                     | 115 |
| Tabla 22. | Cargas a las cuales está sometida la cámara de secado .....                        | 122 |
| Tabla 23. | Materiales para la fabricación del colector-almacenador .....                      | 125 |
| Tabla 24. | Herramienta e instrumentos de medición .....                                       | 125 |
| Tabla 25. | Materiales para la fabricación de la cámara de secado .....                        | 129 |
| Tabla 26. | Herramienta e instrumentos de medición .....                                       | 130 |
| Tabla 27. | Características del sensor de temperatura LM35 .....                               | 134 |
| Tabla 28. | Características del sensor de humedad y temperatura DHT-1 .....                    | 134 |
| Tabla 29. | Características del anemómetro .....   | 135 |
| Tabla 30. | Características de la balanza digital .....  | 135 |
| Tabla 31. | Características del piranómetro .....  | 136 |
| Tabla 32. | Resultados de la prueba de vacío del sistema de secado 07/07/2015 .....            | 143 |
| Tabla 33. | Radiación y velocidad en el interior del sistema de secado 07/07/2015 .....        | 143 |
| Tabla 34. | Resultados de la prueba de vacío del sistema de secado 13/07/2015 .....            | 144 |
| Tabla 35. | Radiación y velocidad en el interior del sistema de secado 13/07/2015 .....        | 144 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Tabla 36. | Resultados de la primera prueba con carga al sistema de secado .....  | 145 |
| Tabla 37. | Resultados de radiación y velocidad dentro del sistema de secado en la primera prueba con carga .....                 | 146 |
| Tabla 38. | Resultados de la segunda prueba con carga al sistema de secado .....  | 147 |
| Tabla 39. | Resultados de radiación y velocidad dentro del sistema de secado en la segunda prueba con carga .....                 | 148 |
| Tabla 40. | Resultados de variación de la masa en función del tiempo para la primera prueba con carga del sistema de secado ..... | 149 |
| Tabla 41. | Resultados de variación de la masa en función del tiempo para la segunda prueba con carga del sistema de secado ..... | 150 |
| Tabla 42. | Temperaturas promedio de la prueba en vacío .....   | 156 |
| Tabla 43. | Temperaturas promedio de la prueba con carga .....  | 161 |
| Tabla 44. | Costos directos de materiales para la fabricación del sistema de secado .....   | 162 |
| Tabla 45. | Costo de mano de obra directa para la construcción del sistema de secado .....  | 164 |
| Tabla 46. | Costo directo de diseño del prototipo de secador solar .....  | 164 |
| Tabla 47. | Resumen de costos directos para la fabricación del prototipo.....   | 164 |
| Tabla 48. | Costos directos de instrumentación y materia prima .....  | 165 |
| Tabla 49. | Costos indirectos por asesoramiento para el diseño del prototipo .....  | 166 |
| Tabla 50. | Costos de mano de obra indirecta .....  | 166 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabla 51. | Costos de servicios básicos .....  | 166 |
| Tabla 52. | Costos indirectos varios .....   | 167 |
| Tabla 53. | Resumen de costos indirectos para la fabricación del<br>prototipo.....                           | 167 |
| Tabla 54. | Costos indirectos de la operación del prototipo .....  | 167 |
| Tabla 55. | Inversión total para la fabricación, montaje y operación<br>del prototipo de secador solar ..... | 168 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Partes de un secador solar .....   | 2  |
| Figura 2. Mapa de zonas de cultivo de ají.....   | 5  |
| Figura 3. Esquema representativo de la definición de desarrollo Sostenible.                                      | 8  |
| Figura 4. Hoja del Capsicum annum.....   | 11 |
| Figura 5. Flor y fruto del Capsicum annum .....  | 12 |
| Figura 6. Estructura molecular de la capsaicina.....   | 15 |
| Figura 7. Curva de velocidad de secado.....  | 18 |
| Figura 8. Secador de bandejas por platos perforados.....   | 24 |
| Figura 9. Secadores de cinta transportadora .....  | 24 |
| Figura 10. Secador rotativo.....   | 25 |
| Figura 11. Secador solar directo .....   | 26 |
| Figura 12. Secador solar indirecto .....   | 26 |
| Figura 13. Secador solar híbrido.....  | 27 |
| Figura 14. Secador de bandejas al vacío.....   | 28 |
| Figura 15. Secador tornillo sin fin.....   | 28 |
| Figura 16. Secador tornillo sin fin.....   | 29 |
| Figura 17. Radiación solar y sus componentes.....  | 30 |
| Figura 18. Piranómetro .....   | 31 |
| Figura 19. Pirheliómetro .....   | 31 |
| Figura 20. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente<br>por un material semitransparente..... | 33 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21. Mapa global de irradiación solar .....  | 34 |
| Figura 22. Insolación Difusa Promedio .....  | 34 |
| Figura 23. Insolación Directa Promedio .....   | 35 |
| Figura 24. Insolación Global Promedio .....  | 35 |
| Figura 25. Elementos de un colector solar .....  | 39 |
| Figura 26. Almacenamiento de energía .....   | 40 |
| Figura 27. Número de Biot .....  | 41 |
| Figura 28. Variación del área de la cámara de secado en función del<br>espesor del lecho de ají .....                                      | 44 |
| Figura 29. Influencia del espesor del lecho de ají en la caída de presión.....   | 44 |
| Figura 30. Curva de velocidad de secado del capsicum annum .....   | 50 |
| Figura 31. Variación de la masa del sólido .....   | 57 |
| Figura 32. Gradiente de temperatura de la cámara de secado .....   | 64 |
| Figura 33. Proceso psicrométrico del aire .....  | 71 |
| Figura 34. Balance de energía para un elemento diferencial del aire en<br>el colector-almacenador y diagrama de resistencias térmicas..... | 74 |
| Figura 35. Balance de energía para elemento diferencial del lecho de<br>rocas y diagrama de resistencias térmicas.....                     | 76 |
| Figura 36. Circuito térmico equivalente para el colector-almacenador .....   | 82 |
| Figura 37. Circuito de resistencias térmicas de convección y radiación .....   | 83 |
| Figura 38. Número de Nusselt para flujo laminar completamente<br>desarrollado en tubos de diferente sección transversal .....              | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 39.Comportamiento en el tiempo de la temperatura superficial del lecho, para diferentes espesores del lecho..... | 90  |
| Figura 40.Eficiencia del colector vs la temperatura del lecho, para diferentes alturas del colector .....               | 91  |
| Figura 41.Longitud del colector en función de la temperatura del lecho para diferentes anchos de colector .....         | 92  |
| Figura 42.Diagrama de flujo del proceso iterativo .....   | 93  |
| Figura 43.Comportamiento de la temperatura del lecho durante el tiempo ..   | 97  |
| Figura 44.Calor almacenado vs el tiempo para varios espesores del lecho .   | 99  |
| Figura 45.Coeficientes de pérdidas (k) para contracciones graduales .....   | 111 |
| Figura 46.Simulación de la estructura del bastidor del colector .....   | 122 |
| Figura 47.Simulación de la estructura de la cámara de secado .....  | 123 |
| Figura 48.Colelector-almacenador y su bastidor.....   | 126 |
| Figura 49.Diagrama de proceso del bastidor .....  | 127 |
| Figura 50.Diagrama de proceso del colector-almacenador .....  | 128 |
| Figura 51.Cámara de secado .....  | 131 |
| Figura 52.Diagrama de proceso para la fabricación de la estructura de la cámara de secado.....                          | 132 |
| Figura 53.Sistema de secado instalado .....   | 133 |
| Figura 54.Tarjeta ARDUINO MEGA.....   | 137 |
| Figura 55.Representación de la operación de adquisición de datos .....  | 137 |
| Figura 56.Eschema de la ubicación de los sensores en el sistema de secado .....   | 140 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 57. Temperaturas en función del tiempo de la primera prueba en vacío del 07/07/2015.....                   | 152 |
| Figura 58. Radiación global del 07/07/2015 .....  | 153 |
| Figura 59. Temperaturas en función del tiempo de la segunda prueba en vacío del 13/07/2015.....                   | 154 |
| Figura 60. Radiación global del 13/07/2015 .....  | 155 |
| Figura 61. Temperatura del lecho de rocas para los datos experimentales y teóricos .....                          | 155 |
| Figura 62. Temperaturas en función del tiempo de la prueba con carga .....  | 157 |
| Figura 63. Variación de la humedad del aire al atravesar el sistema de secado .....                               | 158 |
| Figura 64. Curvas de secado del ají para la prueba con carga .....  | 158 |
| Figura 65. Comparación de la velocidad de secado de la bandeja 1 respecto a la bandeja 3.....                     | 159 |
| Figura 66. Temperatura del lecho de rocas para los datos experimentales y teóricos para la prueba con carga ..... | 160 |

## NOMENCLATURA

|            |   |   |
|------------|---|---|
| $H$        | = | Altura (m)  |
| $a$        | = | Altura del colector (m)   |
| $B$        | = | Ancho (m)   |
| $w$        | = | Ancho del colector (m)  |
| $A$        | = | Área (m <sup>2</sup> )  |
| $A_T$      | = | Área total de la cámara de secado (m <sup>2</sup> )   |
| $A_u$      | = | Área unitaria del ají (m <sup>2</sup> )   |
| $\Delta P$ | = | Caída de presión (Pa)   |
| $Q$        | = | Calor (kJ)  |
| $Q_a$      | = | Calor de almacenamiento del lecho de rocas (J)  |
| $C_p$      | = | Calor específico (J/kg °K)  |
| $Q_{ev}$   | = | Calor latente de vaporización (kJ)  |
| $Q_T$      | = | Calor mínimo necesario para el secado (kJ)  |
| $Q_{aji}$  | = | Calor necesario para calentar la masa de ají (kJ)   |
| $Q_r$      | = | Calor remanente (kJ)  |
| $Q_{agua}$ | = | Calor sensible del agua (kJ)  |
| $M_T$      | = | Capacidad total del secador (kg)  |
| $k$        | = | Coefficiente de conducción (W/m°K)  |
| $k_t$      | = | Coefficiente de conducción de la chapa metálica (W/m°K)   |
| $k_m$      | = | Coefficiente de conducción de la madera ( W/m°K)  |
| $k_e$      | = | Coefficiente de conducción del poliestireno expandido ( W/m°K)  |
| $h_{oi}$   | = | Coefficiente de convección de calor del aire entre la cubierta y el ambiente en la parte inferior (W/m <sup>2</sup> ) |
| $h_i$      | = | Coefficiente de convección en el interior del colector (W/m <sup>2</sup> °K)  |
| $h_o$      | = | Coefficiente de convección externa (W/m <sup>2</sup> °K)  |
| $h_{cr}$   | = | Coefficiente de convección y radiación (W/m <sup>2</sup> °K)  |
| $h_r$      | = | Coefficiente de radiación (W/m <sup>2</sup> °K)   |
| $h_y$      | = | Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °K)  |
| $h_{ri}$   | = | Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el lecho de rocas y la cubierta (W/m <sup>2</sup> °K)      |
| $h_{ro}$   | = | Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta  |

- transparente y el cielo ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ )
- $U_T$  = Coeficiente global de transferencia de calor superior e inferior ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ )
- $\alpha$  = Constante empírica
- $n$  = Día del mes promedio
- $\dot{E}$  = Energía (W)
- $\dot{E}_a$  = Energía almacenada (W)
- $\dot{E}_{alm}$  = Energía almacenada en el sistema (W)
- $q_{neto}$  = Energía aprovechada por el sistema (W)
- $\dot{E}_g$  = Energía generada por una fuente química, etc. (W)
- $I''$  = Energía incidente en el lecho de rocas ( $W/m^2$ )
- $\dot{E}_{ent}$  = Energía que entra al sistema (W)
- $\dot{E}_{sal}$  = Energía que sale del sistema (W)
- $h_{fg}$  = Entalpia de vaporización a la temperatura  $T_i$  (kJ/kg)
- $h_{fg}$  = Entalpia de vaporización a la temperatura  $T_i$  (kJ/kg)
- $e_{ají}$  = Espesor al cual se corta el ají para el proceso de secado (m)
- $L_t$  = Espesor de la chapa metálica(m)
- $L_m$  = Espesor de la madera (m)
- $L_e$  = Espesor del aislante térmico (m)
- $f$  = Factor de fricción
- $q$  = Flujo de calor (W)
- $q_a$  = Flujo de calor del almacenamiento del lecho de rocas (W)
- $q_T$  = Flujo de calor mínimo necesario para el secado (W)
- $q_{ra}''$  = Flujo de calor por radiación ( $W/m^2$ )
- $q_p$  = Flujo de pérdidas de calor en la cámara de secado (W)
- $q_r''$  = Flujo de radiación solar absorbida ( $W/m^2$ )
- $F_B$  = Fuerza de Boyante ( $N/m^3$ )
- $g$  = Gravedad ( $m/s^2$ )
- $h_{he}$  = Horas de helifonía (h)
- $W_a$  = Humedad absoluta del ambiente (%)
- $H_{ru}$  = Humedad de saturación (%)
- $X_s$  = Humedad en base húmeda (%)

- $Y_s$  = Humedad en base seca (%)  
 $HR$  = Humedad relativa (%)  
 $H_{rs}$  = Humedad relativa del aire a la salida del colector (%)  
 $H_{ra}$  = Humedad relativa del ambiente (%)  
 $L$  = Longitud del colector (m)  
 $m$  = Masa (kg)  
 $m_w$  = Masa de agua (kg)  
 $M_{ab}$  = Masa de la muestra por unidad de área (kg/m<sup>2</sup>)  
 $M_{Tf}$  = Masa del producto a la humedad final (kg)  
 $m_{gsaj}$  = Masa gavimétrica seca de ají (gr)  
 $m_{gTaj}$  = Masa gavimétrica total del ají (gr)  
 $m_s$  = Masa seca (kg)  
 $N$  = Número  
 $Bi$  = Número de Biot  
 $N_u$  = Número de Nusselt  
 $Re$  = Número de Reynolds  
 $I_p$  = Pérdidas de calor desde el lecho de rocas hacia el ambiente (W/m<sup>2</sup>)  
 $Q_p$  = Pérdidas de calor en la cámara de secado (kJ)  
 $Pe$  = Perímetro (m)  
 $P_a$  = Presión (Pa)  
 $P$  = Presión (Pa)  
 $P_a$  = Presión atmosférica (kPa)  
 $\Delta B$  = Presión de empuje (Pa)  
 $D$  = Profundidad (m)  
 $I_T$  = Radiación solar (Wh/m<sup>2</sup>día)  
 $r$  = Radio (m)  
 $T$  = Temperatura (°K)  
 $T_a$  = Temperatura de entrada al colector (°K)  
 $T_c$  = Temperatura de la cubierta (°K)  
 $T_i$  = Temperatura de la superficie del ají (°K)  
 $T_u$  = Temperatura de salida del colector (°K)  
 $T_2$  = Temperatura del aire a la salida de la cámara de secado (°C)

- $T_m$  = Temperatura media del aire en el interior del colector ( $^{\circ}\text{K}$ )  
 $T_{Le}$  = Temperatura superficial del lecho de rocas en estado transitorio ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{Lmax}$  = Temperatura superficial del lecho de rocas máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_L$  = Temperatura superficial en el lecho de rocas ( $^{\circ}\text{K}$ )  
 $T_{Lm}$  = Temperatura superficial media del lecho de rocas ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $t$  = Tiempo (s)  
 $t_{he}$  = Tiempo de helifonía (s)  
 $t_T$  = Tiempo mínimo de secado (s)  
 $\Delta M_w$  = Variación de la masa de agua del ají (kg)  
 $v$  = Velocidad (m/s)  
 $G$  = Velocidad de masa del gas desecante ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ )  
 $R$  = Velocidad de secado ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ )  
 $v_w$  = Velocidad del viento (m/s)  
 $V$  = Volumen ( $\text{m}^3$ )

#### SÍMBOLOS GRIEGOS

- $\alpha$  = Absortancia del lecho de rocas  
 $\gamma$  = Ángulo azimut de superficie ( $^{\circ}$ )  
 $\alpha_s$  = Ángulo de altitud solar ( $^{\circ}$ )  
 $\theta$  = Ángulo de incidencia de radiación directa ( $^{\circ}$ )  
 $\omega$  = Ángulo horario ( $^{\circ}$ )  
 $\theta_z$  = Ángulo zenital ( $^{\circ}$ )  
 $\lambda$  = Calor latente de vaporización (J/kg)  
 $\beta t$  = Coeficiente térmico de expansión volumétrica ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )  
 $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}^4$ )  
 $\delta$  = Declinación ( $^{\circ}$ )  
 $\rho$  = Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\phi$  = Diámetro (m)  
 $\eta$  = Eficiencia (%)  
 $\varepsilon$  = Emisividad  
 $\varepsilon_t$  = Emisividad de la chapa metálica  
 $\delta_p$  = Espesor de la espuma de poliestireno expandido, (m)  
 $\delta_{Laji}$  = Espesor del lecho de ají (m)

- $\delta_{Lají}$  = Espesor del lecho de ají (m)  
 $\delta_{Lr}$  = Espesor del lecho de rocas (m)  
 $\beta$  = Inclinación (°)  
 $\varphi$  = Latitud (°)  
 $\rho_{re}$  = Reflectividad  
 $\tau$  = Transmisividad de la cubierta transparente  
 $\mu$  = Viscosidad dinámica (N s/m<sup>2</sup>)

#### SUBÍNDICES

- aire* = Aire  
*ají* = Ají  
*sa* = Alimentación  
 $\infty$  = Ambiente  
*sky* = Cielo  
*cl* = Colector  
*c* = Constante  
*cr* = Crítica del ají  
*chi* = Chimenea  
 $D_h$  = Diámetro hidráulico  
*va* = Final del vapor  
*f* = Final o remanente del ají  
*F* = Grados Fahrenheit  
*ila* = inferior entre el lecho de rocas y el ambiente  
*i* = Inicial del ají  
*Lají* = Lecho de ají  
*Lr* = Lecho de rocas  
*re* = Malla  
*mcs* = Mínima de la cámara de secado  
*ab* = Muestra  
*pr* = Producto  
*rchi* = Reducción en la chimenea  
*r* = Rocas  
*sv* = Saturación de vapor

- s* = Secador
- sca* = Separación a la campana
- se* = Sin aislante
- si* = Sistema
- s* = Superficial en la cámara de secado
- so* = Superficial exterior de la cámara de secado
- AB* = Total por bandeja
- u* = Unitaria del ají
- v* = Vapor
- wv* = Vapor de agua
- sb* = Vaporización
- sla* = superior entre el lecho de rocas y el ambiente

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo diseñar y construir un prototipo de secador solar indirecto con convección natural para el secado del capsicum annum (ají) utilizando un colector-almacenador en lecho de rocas, el cual proporciona la energía necesaria para la deshidratación de 25 kg de producto, en la Comunidad el Cabuyal de la Provincia del Carchi. El diseño inicia con la caracterización del producto, mediante pruebas de laboratorio, llegando así a establecer la curva de velocidad de secado, la humedad inicial del ají, que es de aproximadamente del 87% y la humedad de equilibrio que se encuentra entre el 8 al 10%, bajo estos parámetros el tiempo mínimo de secado es de aproximadamente 33 h, con una energía mínima requerida de 63145.3 KJ, por lo tanto para satisfacer los requerimientos de diseño, se plantea un modelo matemático que describa el comportamiento térmico del colector, tomando en cuenta las condiciones ambientales de la zona y el almacenamiento en la placa absorbidora, además se realiza la simulación para diferentes variables que influyen en la eficiencia del colector y el almacenamiento térmico, obteniendo así curvas que permitan la selección de una adecuada geometría. Llegando así a obtener una eficiencia teórica del colector del 33%, y con una cantidad de energía almacenada del 38% de la energía mínima requerida para el secado. Para la validación del diseño se realizan las pruebas en campo, los cuales arrojaron que para un flujo másico de 0.01 Kg/s y una radiación promedio de  $370 \text{ W/m}^2$ , la eficiencia del colector es 31.25%, la eficiencia del sistema de secado fue de alrededor 16.51%, el tiempo de secado fue de 35 h, la temperatura máxima del lecho fue de 40.57 °C, con ello se alcanzó una temperatura máxima del aire de 30,94 °C, llegando a tener una eficiencia del proceso de secado del 50.33% y una temperatura máxima en la cámara de 30 °C. Obteniendo así un error de diseño del 11.5%.

### **PALABRAS CLAVES:**

**CAPSICUM ANNUM**

**SECADOR SOLAR**

**ALMACENAMIENTO TÉRMICO**

## ABSTRACT

This titling project aims to design and build a prototype of indirect solar dryer with natural convection for drying capsicum annum (chili pepper) using a collector-storage in rock bed, which provides the energy required for the dehydration of 25 kg of product in the Cabuyal Community of Carchi Province. The design begins with a characterization of the product, through laboratory tests, reaching to define the drying rate curve, the initial moisture chili pepper, which is approximately 87% and equilibrium moisture content is 8 to 10% ,under these parameters, the minimum drying time is about 33 h, with a minimum energy required to 63145.3 kJ, therefore to satisfy the design requirements, a mathematical model is proposed that describes the thermal behavior of the collector, taking into account environmental conditions in the area and the storage in the absorber plate, moreover to simulating different variables which influence the collector efficiency and of thermal storage, thus obtaining curves which allow for selection of a suitable geometry. Thus leading to obtain a theoretical collector efficiency of 33%, and an amount of stored energy of 38% of the minimum energy required for drying. To design validation testing is performed in the field, which showed that for a mass flow of 0.01 kg / s and an average radiation of 370 W /m<sup>2</sup>, the collector efficiency is 31.25%, the efficiency of the drying system was about 16.51%, the drying time was of 35 h, the maximum bed temperature was 40.57°C, thereby reached a maximum air temperature of 30.94 °C, coming to have a drying efficiency of 50.33% and a maximum temperature in the chamber of 30 °C. Obtaining a design error of 11.5%.

### KEYWORDS:

**CAPSICUM ANNUM**

**SOLAR DRYER**

**THERMAL STORAGE**

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

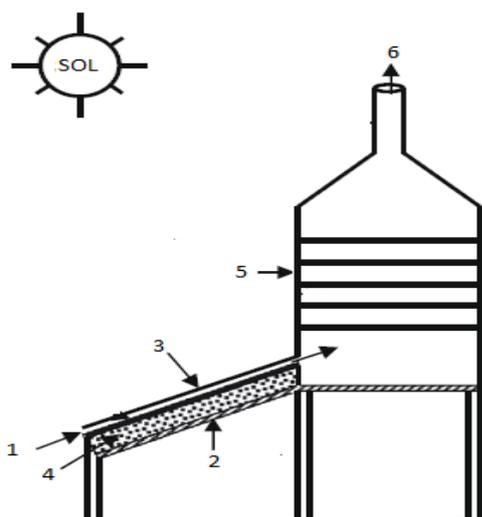
A lo largo de la historia uno de los inconvenientes que ha enfrentado el ser humano es la conservación de los alimentos ya hace unos 400.000 años (Herrera M. , 2012,p.7), se secaban al sol alimentos para extender el periodo de consumo de frutas, granos, vegetales, carnes y mariscos, dando así una posibilidad de subsistencia en épocas de escasez. A partir de esto se ha masificado el estudio e innovación del proceso de secado el mismo que consiste en eliminar la cantidad de agua presente en los alimentos tratando de preservar la calidad y nutrientes de los mismos, lo cual se consigue teniendo contenidos de humedad alrededor del 9 al 13 % (McCabe, Smith, & Harriot, 2007). Siendo uno de los principales inconveniente del secado al aire libre la contaminación a la que están expuestas, por esto se ha visto la necesidad de crear recintos cerrados que impidan el contacto con agentes externos como insectos, partículas de polvo, condiciones climáticas desfavorables, etc, lo que garantiza la calidad de los alimentos.

Alrededor del mundo se han desarrollado varios procedimientos para secar los productos agrícolas cuya principal característica es el uso del aire como fluido de trabajo. De manera simplificada se puede clasificar a los secadores en:

- Secadores de lecho fijo
- Secadores al vacío
- Secadores solares

Una de las opciones más económicas y ecológicas que existen es la utilización de colectores solares para calentamiento de aire, el mismo que posteriormente pasa sobre el producto ubicando en bandejas en una cámara de secado.

Un secador solar está compuesto por los siguientes elementos, solar (1 y 6) entrada y salida de aire, (2) colector solar, (3) cubierta transparente, (4) placa absorbedora, (5) cámara de secado, los mismos que se indican en la figura 1.



**Figura 1. Partes de un secador solar**

Fuente: (Jairaj, Singh, & Srikant, 2009)

Un colector solar almacena y transfiere la energía radiante del sol a un fluido caloportador que puede ser el aire, mediante convección y radiación, comúnmente los colectores solares aprovechan la gama de longitud de onda que está comprendida entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $3,0 \mu\text{m}$ , en la franja de radiación que llega a la superficie terrestre. (Cabrera & Marín, 2009,p.121).

Debido a la disponibilidad intermitente de radiación solar que limita su uso continuo en el calentamiento de aire del sistema, ante esta situación se ha planteado la búsqueda de dispositivos de almacenamiento de energía térmica, por lo que una de las alternativas ha sido el almacenamiento por calor sensible que consiste en el uso de materiales en el colector que no presenten cambio de fase en el rango de temperaturas del proceso, esto involucra tanto a sólidos como a líquidos; sin embargo el problema al que está sometido el uso de fluidos es que requieren intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento los mismos que se ven afectados por

problemas de corrosión, fugas, sedimentación, entre otros, lo que eleva los costos de fabricación y operación, por lo que una de las alternativas más viables es el uso de materiales sólidos, con alta capacitancia térmica como son: cerámicos, piedras, ladrillo, las tejas de arcilla, etc.

Al almacenar energía térmica por calor sensible, uno de los factores predominantes para la selección del material de la placa absorbidora es el calor específico del medio, el cambio de temperatura y la cantidad de material de almacenamiento puesto que de esto dependerá la cantidad de calor que se almacene en el colector. En la tabla 1, se muestran algunos materiales sólidos y líquidos comúnmente usados para el almacenamiento de energía térmica por calor sensible.

**Tabla 1.**

**Lista de materiales sólidos-líquidos usuales para el almacenamiento de calor sensible**

| Medio    | Tipo de fluido | Rango de Temperatura | Densidad                | Calor específico |
|----------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------|
|          |                | [ °C]                | [ kg / m <sup>3</sup> ] | [ J/ Kg °K ]     |
| Roca     |                | 20                   | 2560                    | 879              |
| Ladrillo |                | 20                   | 1600                    | 840              |
| Hormigón |                | 20                   | 1900-2300               | 880              |
| Agua     |                | 0-100                | 1000                    | 4190             |
| Etano    | Líquido        | Sobre los 78         | 790                     | 2400             |
| Octano   | Líquido        | Sobre los 126        | 704                     | 2400             |

Fuente: (Bal, Satya, & Naik, 2010)

Desde el punto de vista de capacidad de almacenamiento de calor el agua es mejor que cualquier medio usado para este fin, esto se debe a que posee un elevado valor de calor específico, por ejemplo un volumen de agua determinado puede contener más de tres veces el calor que el mismo volumen de rocas. Pero la utilización de rocas elimina los problemas que tiene el uso de agua, además es un material casi universalmente disponible, económico, no es un recurso natural vital para el hombre y posee un valor de Cp razonablemente aceptable, una alta densidad y conductividad térmica

baja, lo que convierten a las rocas en un material adecuado para aplicaciones de sistemas de energía solar. La eficiencia del calentamiento de aire, por radiación solar no depende únicamente de las horas pico de radiación, por ese motivo el almacenamiento calor fue considerado por Speyer en el año de 1956, el cual modela el comportamiento de un absorbedor solar con lecho de rocas. Desde entonces, una gran cantidad de trabajos de investigación han sido reportados por varios investigadores en el almacenamiento de energía.

Al encontrarse el Ecuador atravesado por la línea ecuatorial dispone de un alto potencial energético solar, el mismo que es utilizado en varias aplicaciones como: el calentamiento de agua sanitaria, secado de productos agrícolas, generación eléctrica, etc. En el caso de la provincia del Carchi, la insolación incidente promedio es de alrededor de  $4950 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$  (Consejo Nacional de Electricidad, 2008), siendo una de las regiones donde registra mayor radiación solar durante todo el año.

El Ecuador por su ubicación geográfica, se caracteriza por tener diversos pisos climáticos lo que permiten el cultivo de una gran variedad de productos. Sin embargo, el control de plagas se lo realiza utilizando productos químicos los mismos que afectan a la salud y el medio ambiente es por esta razón que el gobierno Ecuatoriano ha impulsado proyectos y leyes que controlen la utilización de estos como es el Plan nacional de implementación para la gestión de los contaminantes orgánicos presentes en el Ecuador COPs (Gestión COPS, 2006). Por otro lado en varias ciudades del país se vienen comercializando productos orgánicos esto gracias a la implementación de la ley de Orgánica del régimen de la soberanía alimentaria, que promueve el consumo de alimentos sanos, nutritivos y amigables con el medio ambiente (Conferencia Plurinacional e intercultural de soberanía alimentaria, 2014).

En varias zonas del país se cultivan productos que por sus características pueden ser utilizados como fungicidas e insecticidas orgánicos. Este es el caso del ají que contiene capsaicina, "sustancia que

posee acción antiviral, insecticida y repelente” (Millan, 2008), y que sirve para el control de varias plagas como:

- Hormigas
- Gusanos
- Pulgones
- Larvas de lepidópteros
- Áfidos

En los últimos años se ha visto incrementado el cultivo de ají en diferentes lugares como se indica en la figura 2, este es el caso de la comunidad del Cabuyal que por sus características topográficas y climáticas hace de ella un lugar propicio para el cultivo de productos de ciclo corto y combinada con su elevado grado de incidencia solar lo convierten en un lugar estratégico para el cultivo y deshidratación del ají.



**Figura 2. Mapa de zonas de cultivo de ají**

Fuente: (PROAJI, 2009)

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas que se han presentado en la provincia del Carchi es el uso excesivo de productos químicos para el control y eliminación de plagas. La mayoría de insecticidas y plaguicidas comúnmente usadas en Ecuador se las considera entre los más peligrosos del mundo; el mancozeb, carbofuran y metamidofos (Aldás, 2012)., constituyen el 80%, 47% y 43%, respectivamente, como ingredientes activos de todos los funguicidas e insecticidas, diocarbonados y carbonatados aplicados debido a su alta toxicidad por lo que los convierten en uno de los productos utilizados en gran cantidad (Yanggen, Crissman, & Espinosa, 2002)., su uso está restringido en América del Norte debido a su gran toxicidad y fácil absorción.

El uso de estos productos a su vez a derivado en enfermedades cancerígenas, intoxicaciones, cambio del sistema inmunológico y neurológico aproximadamente el 11%, 57% y 31% respectivamente (Ministerio de Ambiente, 2006)., que afectan a los productores y consumidores, además de afectar al equilibrio del ecosistema. Por otro lado los elevados costos de estas sustancias químicas han provocado que varias familias en las comunidades dejen de cultivar productos alimenticios, afectando directamente a la seguridad alimentaria de sus pobladores. A pesar de que el ají es un producto que se cultiva prácticamente en todas las regiones del Ecuador, éste no ha sido considerado como materia prima para la elaboración de plaguicidas, ya que la mayoría de casos sólo se lo utiliza para el consumo humano, además considerando la economía de los pobladores de la comunidad es necesario construir un sistema de secado que sea amigable con el medio ambiente, con materiales de larga duración, de fácil construcción, mantenimiento y operación, que permita la producción de ají seco para la elaboración de plaguicidas e insecticidas orgánicos.

## 1.3 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de secador solar para el secado del capsicum annum (ají) con colector-almacenador en lecho de rocas con una

capacidad de 25 kg, para la Comunidad el Cabuyal, ubicado en la parroquia Juan Montalvo del Cantón Mira de la Provincia del Carchi.

#### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la humedad y la curva de secado del capsicum annum (ají).
- Diseñar la cámara de secado y establecer el número de bandejas requeridas.
- Plantear un modelo matemático que describa el comportamiento térmico del colector – almacenador.
- Simular el comportamiento térmico del colector-almacenador de energía.
- Seleccionar los materiales de construcción del sistema de secado.
- Construir un sistema de secado solar con colector-almacenador de energía.
- Elaborar planos de construcción.
- Evaluar el comportamiento térmico del sistema mediante pruebas de operación y analizar los resultados.
- Realizar el análisis de costos del sistema de secado solar.

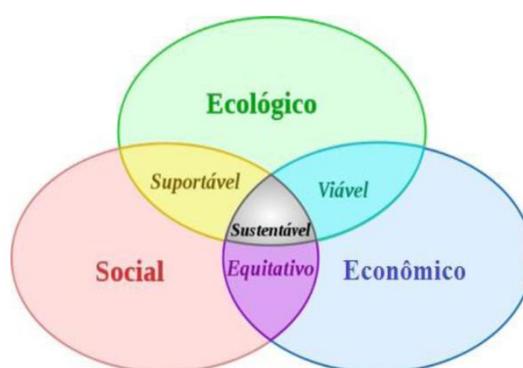
#### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

En el Ecuador como en otros países la agricultura familiar es la fuente para promover un desarrollo equitativo y equilibrado por lo que; (Salcedo & Guzmán, 2014) señala que:

“Los pequeños agricultores son aliados de la seguridad alimentaria y actores protagónicos en el esfuerzo de los países por lograr un futuro sin hambre. En nuestra región, el 80% de las explotaciones pertenecen a la agricultura familiar, incluyendo a más de 60 millones de personas, convirtiéndose en la principal fuente de empleo agrícola y rural” (p.4).

Además la preocupación mundial actual, para la preservación de nuestro planeta es la de atenuar, los efectos causados por el cambio climático,

especialmente el efecto invernadero, lo que se ha manifestado en las variaciones bruscas del clima de nuestro planeta y el apareamiento de enfermedades por la utilización de sustancias químicas para el control de plagas. Una de las acciones que se deben tomar es disminuir el uso de plaguicidas químicos, el uso de energías convencionales en la agricultura, orientándose a la utilización de las energías renovables como es el caso de la energía solar y plaguicidas orgánicos, con el propósito de conseguir un desarrollo sostenible (Figura 3).



**Figura 3. Esquema representativo de la definición de desarrollo Sostenible**

Fuente: (Sousa, 2012)

El Cabuyal al ser parte de un esquema productivo dependientes de productos químicos en la agricultura, los cuales representan un gasto elevado, que ha provocado a este en un sitio cada vez más vulnerable a la dependencia del monocultivo, generando un impacto en:

- La disminución en los cultivos de autoconsumo.
- Pérdida de diversidad genética.
- Menor capacidad de los ecosistemas para recuperarse.

Esto ha puesto en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria, exponiendo así a los pequeños productores a plagas, enfermedades y riesgos asociados al clima. Por lo cual se plantea como alternativa la elaboración de un sistema de secado solar, con el propósito de mejorar la

calidad de vida del sector agrícola rural, tanto desde el punto de vista económico, social y ambiental.

## **1.6 ALCANCE DEL PROYECTO**

La búsqueda de soluciones tendientes a mejorar la calidad de vida del pequeño agricultor orienta a este proyecto a fijarse como alcance el diseño, construcción y pruebas de un sistema de secado para una capacidad de 25 kg de ají, utilizando un colector-almacenador solar para aire, construido en base a un lecho de rocas, para lo cual se contemplará las siguientes etapas:

- Diseño del sistema de secado.
- Diseño y simulación del colector-almacenador
- Selección y estudio de materiales de construcción del sistema de secado.
- Elaboración de planos de construcción.
- Construcción y operación del prototipo.
- Pruebas y análisis de resultados.

La construcción se realizará utilizando en su mayoría materiales adecuados para esta aplicación, con el empleo de herramientas básicas y procesos de montaje que puedan ser realizados por los miembros de la comunidad. Se determinara el tiempo necesario que deba estar el producto para llegar a la cantidad de humedad requerida para la elaboración del plaguicida orgánico.

El presente proyecto no contempla la elaboración de la formulación del insecticida a base de ají, la instrumentación a utilizar en el prototipo, solo se la empleará para la obtención de datos y análisis de resultados sin llegar a ser automatizado.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se encuentra todo el sustento teórico que se utiliza para la realización de este proyecto, donde se establecen características del producto a secar, conceptos básicos del proceso de secado y fundamentos de transferencia de calor.

#### **2.1 CAPSICUM ANNUM (AJÍ)**

##### **2.1.1 ORIGEN DEL CAPSICUM ANNUM**

Estudios realizados muestran que el capsicum annum se originó en América del Sur, presentando mayores variedades en los países centro Americanos y del Caribe, esta especie fue introducida a Europa y al resto del mundo, luego del descubrimiento de América por partes de los españoles. En el Ecuador hasta la actualidad se han descubierto 9 especies de ají de acuerdo al Departamento Nacional de Recursos Fitogenéticos DENAREF, siendo el Capsicum Galapagoense, la única especie endémica del Ecuador (Siguencia, 2010) .

Entre las especies domesticadas de mayor consumo figuran el Capsicum Baccatum, Capsicum Chinense, Capsicum Frutescens, Capsicum Pubescens, siendo estas originarias de la región andina y amazónica de América Latina. Ecuador, Perú y Bolivia son los países donde se encuentran en mayor cantidad estas especies, gracias a que presentan condiciones climatológicas, favorables para el crecimiento de estas variedades de capsicum (Siguencia, 2010).

##### **2.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL CAPSICUM ANNUM**

Recibe el nombre de Capsicum, debido a que su semilla se encuentra encapsulada en una especie de caja. Esta especie tiene una gran variedad de plantas y frutos los cuales pueden ser dulces como es el caso del pimiento y picantes como el ají, (Herrera M. , 2012).

### 2.1.2.1 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

El ají presenta la siguiente taxonomía según la ITIS (Integrated Taxonomic Information System of North América), como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.**

#### **Taxonomía del Capsicum Annum**

| TAXONOMÍA DEL CAPSICUM |               |
|------------------------|---------------|
| <b>Reino</b>           | Plantae       |
| <b>División</b>        | Magnoliophyta |
| <b>Clase</b>           | Magnoliopsida |
| <b>Subclase</b>        | Astaranae     |
| <b>Orden</b>           | Solanales     |
| <b>Familia</b>         | Salanaceae    |
| <b>Género</b>          | Capsicum L    |



Fuente: (Calderón, 2003)

### 2.1.2.2 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL CAPSICUM ANNUM

Es una planta herbácea que presenta un crecimiento simpondial, donde sus ramas se forman de nudos y su tallo no presenta tejidos fibrosos, alcanza una altura promedio de aproximadamente 1.50 m (Lopez, 2015.p.9).

Sus hojas son aovadas, crecen al final de las ramas solas o en pares, sus medidas promedio están entre los 4 a 12 cm, presentan un color verdoso brillante (figura 4).



**Figura 4. Hoja del Capsicum annum**

Fuente: (Calderón, 2003)

Las flores tienen una coloración blanca, el cáliz tiene una forma acampanada con 5 o 7 pétalos principales, la corola puede medir aproximadamente 1 cm (figura 5).



**Figura 5. Flor y fruto del Capsicum annum**

Fuente: (Nogueira, 2013)

El fruto puede tener variadas formas, pero por lo general es ovalada alargada y cónica al final, donde sus semillas se encuentran adheridas a la parte central del fruto, tiene una textura semi cartilaginosa, su color puede variar entre rojo, amarillo y naranja dependiendo de la especie.

### 2.1.2.3 VALOR NUTRICIONAL

El ají es rico en vitamina A y C, un ají fresco puede contener hasta el doble de vitamina C que la naranja, además es uno de los vegetales con mayor cantidad de ácido ascórbico (Farinango, 2007)., el cual es un excelente antioxidante, se presenta en la tabla 3 el contenido nutricional del ají.

**Tabla 3.**

**Valor nutricional del capsicum annum por cada 100 mg**

| VALOR NUTRICIONAL |         |                    |                   |
|-------------------|---------|--------------------|-------------------|
| <b>Hierro</b>     | 0.75 mg | <b>Vitamina B1</b> | 7 %               |
| <b>Cobre</b>      | 0.10 mg | <b>Vitamina B2</b> | 3 %               |
| <b>Zinc</b>       | 0.18 mg | <b>Vitamina B3</b> | 5 %               |
| <b>Magnesio</b>   | 10 mg   | <b>Vitamina B6</b> | 0.16 %            |
|                   |         |                    | <b>Continua →</b> |

|                        |         |                      |         |
|------------------------|---------|----------------------|---------|
| <b>Sodio</b>           | 2 mg    | <b>Vitamina C</b>    | 200 %   |
| <b>Potasio</b>         | 190 mg  | <b>Vitamina D</b>    | 3 %     |
| <b>Calcio</b>          | 11 mg   | <b>Vitamina E</b>    | 4 %     |
| <b>Fosforo</b>         | 30 mg   | <b>Vitamina K</b>    | 10 %    |
| <b>Tiamina</b>         | 0.09 mg | <b>Agua</b>          | 94 %    |
| <b>Riboflavina</b>     | 0.05 mg | <b>Energía</b>       | 20 Kcal |
| <b>Niacina</b>         | 0.55 mg | <b>Proteínas</b>     | 0.9 %   |
| <b>Ácido ascórbico</b> | 80.4 mg | <b>Grasa</b>         | 0.2 %   |
| <b>Retinol</b>         | 27 µg   | <b>Fibra</b>         | 1.7 %   |
| <b>DFE</b>             | 3 %     | <b>Azúcares</b>      | 2.40 g  |
| <b>Vitamina A</b>      | 3 %     | <b>Carbohidratos</b> | 4.46 g  |

Fuente: (Nogueira, 2013)

### 2.1.3 CLIMA Y TEMPERATURA DE CULTIVO

El ají es sensible a cambios brusco de temperatura, por este motivo los climas cálidos y alturas no mayores a los tres mil metros sobre el nivel del mar, son adecuados para su cultivo. Temperaturas que oscilen entre los 20 a 30 °C, aseguran una germinación en una periodo de nueve a diez días y temperaturas entre los 20 a 22 °C favorecen al crecimiento y reproducción del ají (Puertos & Gastelu, 2011) .

### 2.1.4 CULTIVO Y COSECHA

El cultivo se lo realiza mediante la siembra por semilla. La germinación se produce entre 15 a 17 días y para alcanzar una altura de 10 cm, demora aproximadamente un mes, la floración empieza luego de transcurrir un periodo comprendido entre 60 a 120 días y los frutos comienzan a formarse a partir de los 120 días.

El tiempo de cosecha del ají, es determinado por el tamaño y la madurez del fruto, la cual puede ser iniciada transcurrido 4 o 5 meses luego de su siembra. Por otro lado el ají puede ser sembrado y cosechado durante todo el año, siendo más propicia su siembra en los meses cálidos, ya que el cambio brusco de temperaturas (heladas) no permite un desarrollo adecuado de la planta (Cobos, 2011).

### **2.1.5 HUMEDAD**

El género *Capsicum* tiene una humedad en base húmeda, que oscila entre el 60% y el 89%, dependiendo de la especie, lo que la convierte en un vegetal con un elevado contenido de agua. Humedades superiores al valor anteriormente mencionado provocan el agrietamiento del fruto y compactación del polen, en cambio humedades bajas no permiten que el polen se fijen a las flores, todos estos fenómenos ocurren debido a un estrés hídrico, es decir cuando la planta está sometida a un exceso de agua o ausencia de ella (Puertos & Gastelu, 2011).

### **2.1.6 PRODUCCIÓN DEL AJÍ EN EL ECUADOR**

El crecimiento del cultivo de ají en el 2014 se incrementó en un 0.9% con relación al año 2006 (Instituto Ecuatoriano de estadísticas y censos, 2014) la zona en la cuales se encuentra esta especie cultivada en mayor cantidad es en la región costa de nuestro país, puesto que en estos lugares el clima favorece al desarrollo de esta especie, las provincias en las cuales se ha incrementado la siembra y comercialización de este producto son:

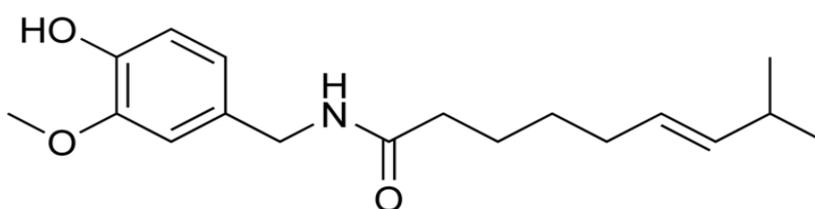
- Guayas
- Manabí
- Esmeraldas

El 70% de la superficie cultivada de ají se encuentra dividida entre estas tres provincias, en donde el 45% está en la provincia de Manabí en las poblaciones de Calceta, el Paisaje, San Vicente del Mache, el Roció y la Concordia, el 15% en la provincia del Guayas en Pedro Carbo y el 10% en Quinindé provincia de Esmeraldas, el 30% restante se de la producción de ají se encuentra distribuido en las región sierra en las provincias del Carchi y Loja (PROAJI, 2009).

La figura 2 muestra la distribución de cultivos en el territorio Ecuatoriano.

### 2.1.7 CAPSAICINA

La pungencia o ardor que se produce cuando se consume el ají, es producido por la capsaicina sustancia química, la cual es un compuesto sólido que tiene forma de agujas llamadas capsicina que es una oleorresina, el cual es un componente activo en las especies de plantas del género capsicum y que solo es percibida por los mamíferos y algunos insectos. La composición química de la capsaicina es, 8 metil-N-Vanillil-6-ninenamida (Puertos & Gastelu, 2011) (figura 6).



**Figura 6. Estructura molecular de la capsaicina**

Fuente: (Puertos & Gastelu, 2011)

La pungencia es medida en base a la escala de Scoville, la cual consiste en diluir ají en agua azucarada hasta que el ardor del mismo desaparezca, en la tabla 4 se muestra las unidades de pungencia de Scoville para diferentes tipos de ají (Puertos & Gastelu, 2011.p.9-10).

**Tabla 4.**

**Escala de Scoville para diferentes tipos de capsicum**

| ESCALA DE SCOVILLE |                 |
|--------------------|-----------------|
| Tipo               | Unidad Scoville |
| Capsicina pura     | 16000000        |
| Habanero           | 150000 - 325000 |
| Piquen             | 50000-100000    |
| Tabasco            | 3000-60000      |
| Capsicum baccatum  | 30000-50000     |
| Serrano            | 10000-20000     |
| Jalapeño           | 2500-5000       |
| Pimiento           | 0-100           |

Fuente: (Puertos & Gastelu, 2011)

### 2.1.8 USOS DEL CAPSICUM ANNUM

El ají presenta múltiples usos tanto en el ámbito industrial como materia prima en la medicina y como condimento, todo esto gracias a que el capsicum annum es un excelente antioxidante y tiene un elevado contenido de capsicina que se la usa en la fabricación de diferentes productos, a continuación se describen las áreas de aplicación.

**Industria:** El empleo del Capsicum annum a nivel industrial, ha sido un elemento importante en el desarrollo de la industria farmacéutica, alimenticia, de seguridad y química, como materia prima. En la industria farmacéutica es utilizada como componente para la fabricación de medicamentos que ayudan a controlar la obesidad, trastornos digestivos, como relajantes musculares, etc.

La industria alimenticia fabrica en base al capsicum annum, condimentos, salsas, pastas, etc, además es usado como especie para elaboración de quesos, embutidos, entre otros. En la industria química se producen, colorantes, sustancias irritantes, las cuales son empleadas para la fabricación de elementos de autodefensa como lo es el gas pimienta, además también se elaboran fungicidas e insecticidas para cultivos de hortícolas, florícolas y de banano, ya que la capsicina es un eficiente repelente de áfidos, pulgones, ácaros, mosca blanca y trípodos.

**Medicina:** Antes de la conquista Española, ya los pueblos indígenas utilizaban al ají, como un medicamento para combatir enfermedades, en la actualidad la medicina moderna usa el ají para tratar afecciones respiratorias, de la piel, problemas reumatológicos y cardiovascular, además también es utilizado como un analgésico.

### 2.1.9 MÉTODOS DE CONSERVACIÓN DEL CAPSICUM ANNUM

La conservación de los alimentos consiste en evitar que microorganismos y enzimas, que modifiquen las características orgánicas del producto. Una de las formas más utilizadas para la conservación del ají es el proceso de deshidratación, que por lo general es secado al sol, esto

puede llevar unos 15 días aproximadamente para alcanzar una humedad entre el 13 al 15%, de manera industrial el proceso de secado puede tardar entre 20 a 35 horas.

Según (Herrera M. , 2012):

“Otra de las formas para la conservación de este producto es el encurtido, el cual consiste en sumergir el ají en una emulsión de vinagre blanco, azúcar, hierbas y especias”(p.24).

## **2.2 SECADO DE ALIMENTOS**

El proceso más antiguo para la preservación de alimentos ha sido el secado, siendo este uno de los más importantes y practicados alrededor del mundo.

### **2.2.1 PROCESO DE SECADO**

El proceso de secado es definido como la transferencia de calor y masa, entre un producto y un fluido de trabajo, el cual es el encargado de retirar parte de la humedad contenida en el mismo, hasta llegar a un equilibrio entre el agua removida y la humedad absorbida por fluido secante.

La transferencia de masa, generada por una diferencia de concentraciones, se da entre el medio encargado de retirar la humedad que generalmente es el aire y el sólido húmedo que es capaz de cederle parte de la cantidad de agua contenida en dos etapas:

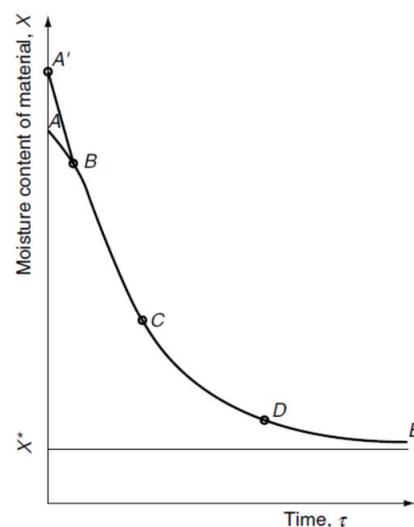
- La primera etapa consiste en la evaporización del agua presente en la superficie exterior del producto húmedo hacia el aire.
- La segunda etapa consiste en la transferencia de masa, la cual es producida por un gradiente de presión, que se da entre el agua en el interior del producto y el aire exterior, el cual permite la difusión de vapor de agua del interior hacia la superficie del alimento.

Estas etapas ocurren debido a un gradiente de temperatura que se produce entre el ambiente circundante y el agua contenida en el interior del alimento, la transferencia de calor tienen lugar en la parte exterior por

convección y radiación, mientras que en la parte interior únicamente se produce por conducción.

### 2.2.1.1 PERIODOS DE SECADO

El proceso de secado está dividido por periodos, en los cuales se producen cambios en la humedad interna del alimento, esto se encuentra reflejado en la curva de secado característica para cada alimento. La figura 7 muestra la curva típica de secado por convección, en la cual se pueden encontrar los siguientes periodos:



**Figura 7. Curva de velocidad de secado**

Fuente: (Handbook of industrial drying, 2006)

**Periodo de precalentamiento:** Este periodo está comprendido en el segmento AB, en el cual se produce un ligero calentamiento del agua contenida en el sólido, adaptándose a las condiciones de secado, su temperatura alcanza un valor constante, este periodo es relativamente corto con relación al tiempo total de secado, ya que al inicio del proceso, el alimento se encuentra a temperatura ambiente y por lo tanto la velocidad de transferencia de calor es alta, a medida que la superficie del producto se calienta, el gradiente de temperatura disminuye, es decir se ha alcanzado el equilibrio estacionario.

**Período de velocidad constante:** Esta fase ocurre en el segmento BC, donde se produce la mayor evaporización de agua del sólido, esto ocurre debido a que la superficie del sólido se satura a medida que la transferencia de masa aumenta, en este periodo la velocidad de transferencia de calor es igual a la tasa de transferencia de masa, y la temperatura de la superficie del sólido permanece constante hasta que se llegue a una humedad crítica, en la cual la cantidad de agua transportada desde el interior no es la suficiente para mantener saturada a la superficie del sólido.

**Periodo de velocidad decreciente:** Es el periodo en donde la velocidad de transferencia de masa disminuye, debido a que existe una mayor resistencia externa, por lo cual la remoción de humedad es lenta, esta etapa inicia en el punto de humedad crítica (C) hasta llegar a una humedad de equilibrio, es decir cuando la presión de vapor de agua contenida en el sólido es igual a la presión parcial de agua en el aire que lo rodea.

## **2.2.2 VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SECADO**

Existen parámetros que influyen directamente en el tiempo de secado, que al final será la base para seleccionar el proceso adecuado para realizar el secado de cierto producto, las cuales depende básicamente de las condiciones ambientales y de las características del producto.

### **2.2.2.1 CONDICIONES AMBIENTALES**

Dentro de las condiciones ambientales que influyen directamente en el proceso de secado, las más importantes son:

**Temperatura y humedad relativa del aire:** Estas dos variables están relacionada con la capacidad que tiene el aire para absorber agua y depende de sus propiedades termodinámicas.

La temperatura del aire puede ser expresada tanto en bulbo húmedo la cual es leída cuando el bulbo de un termómetro se coloca sobre una base húmeda, la evaporación del agua provoca un descenso de temperatura con relación al bulbo seco, como en bulbo seco esta es medida con un termómetro de mercurio colocado en una mezcla de aire y vapor de agua.

La humedad relativa del aire es la relación existente entre la presión parcial de vapor y la presión de saturación de vapor que tendría al 100%, a una misma temperatura.

$$HR = \frac{P_v}{P_{sv}} * 100\% \quad (1)$$

Dónde:

$HR$  = Humedad relativa (%)

$P_v$  = Presión parcial de vapor (Pa)

$P_{sv}$  = Presión de saturación de vapor (Pa)

**Densidad y flujo de aire:** En los sistemas de circulación natural, el movimiento del aire se produce por una diferencia de densidades y la aceleración de la gravedad, mientras que una circulación forzada viene dada por el ventilador. La saturación del aire se lo puede explicar y visualizar con el uso de las cartas psicrométricas, la cual estudia las relaciones existentes entre el aire y el vapor de agua, estas varían dependiendo de la altura y la presión atmosférica, este proceso se explica con más detalle en el capítulo 3.

#### 2.2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

Las características del producto permiten fijar parámetros fundamentales para el diseño del sistema de secado, estas son:

**Humedad inicial y final del producto:** La humedad inicial es la cantidad total de agua contenida en un sólido, mientras que la final es la cantidad de agua que se desea dejar en el sólido de acuerdo a la aplicación y periodo de conservación que se desea obtener. El contenido de humedad puede ser expresado en base húmeda y base seca:

Base seca, es la masa de agua referida a la cantidad de materia seca contenida en el producto.

$$Y_s = \frac{m_w}{m_s} * 100\% \quad (2)$$

Base, húmeda es la masa de agua referida a la masa total del producto

$$X_s = \frac{m_w}{m_T} * 100\% \quad (3)$$

Dónde:

$X_s$  = Humedad en base húmeda (%)

$Y_s$  = Humedad en base seca (%)

$m_w$  = Masa de agua ( kg)

$m_s$  = Masa seca ( kg)

**Temperatura máxima de secado del producto:** Esta temperatura varía en cada producto y va indicar el valor máximo permisible en el que se puede trabajar para evitar que pierda su capacidad de eliminar agua contenida en el interior y sus características principales.

### 2.2.2.3 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En fenómenos de convección, los coeficientes de transmisión de calor dependen de la geometría del sistema, la velocidad del gas sobre la superficie de evaporización y las propiedades típicas del gas desecante, lo cual se verá reflejado en el tiempo de secado, un coeficiente de transferencia de calor bajo, involucra un tiempo de secado mayor y viceversa. El cálculo de la velocidad de secado es recomendable que se realice usando los coeficientes de transferencia de calor, ya que estos se acercan más a la realidad (Perry & Chilton, 1986).

$$h_y = \alpha * G^{0.78} \quad (4)$$

Dónde:

$h_y$  = Coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>°K)

$\alpha$  = Constante empírica

$G$  = Velocidad de masa del gas desecante ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ )

En la ecuación 4, indica el coeficiente de convección cuando la dirección del aire es normal a la superficie del producto a secar, en donde  $\alpha$  es un factor que depende del espaciamiento entre las bandejas.

#### 2.2.2.4 ENERGÍA NECESARIA PARA EL SECADO

La cantidad de energía que se debe suministrar para el proceso de secado, debe ser la suficiente para satisfacer las siguientes etapas:

- Calentar la masa del sólido, esta es la energía necesaria para llegar a la temperatura de evaporización.
- Evaporar el líquido
- Calentar los sólidos hasta su temperatura final
- Calentar el vapor hasta su temperatura final
- Calentar el aire u otro gas agregado hasta su temperatura final

La energía para evaporar el líquido del sólido por lo general siempre es el mayor requerimiento de energía en el secado, considerando las otras etapas como despreciables en relación a esta (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

(McCabe, Smith, & Harriot, 2007), propone el siguiente balance de energía para el cálculo de la energía mínima requerida para un proceso de secado de sólidos, ecuación 5:

$$\frac{q_T}{\dot{m}_s} = C p_{pr}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a C p_l(T_v - T_{sa}) + (X_a - X_b)\lambda + X_b C p_l(T_{sb} - T_v) + (X_a - X_b)C p_v(T_{va} - T_v) \quad (5)$$

Dónde:

$\frac{q_T}{\dot{m}_s}$  = Cantidad de calor transferido por unidad de masa de sólido (J/kg)

$T_{sa}$  = Temperatura de alimentación ( $^{\circ}\text{K}$ )

|           |   |
|-----------|---|
| $T_{sb}$  | = Temperatura de vaporización (°K)        |
| $T_{va}$  | = Temperatura final del vapor (°K)        |
| $\lambda$ | = Calor latente de vaporización (J/kg)    |
| $Cp_{pr}$ | = Calor específico del producto (J/kg °K) |
| $Cp_l$    | = Calor específico del líquido (J/kg °K)  |
| $Cp_v$    | = Calor específico del vapor (J/kg °K)    |

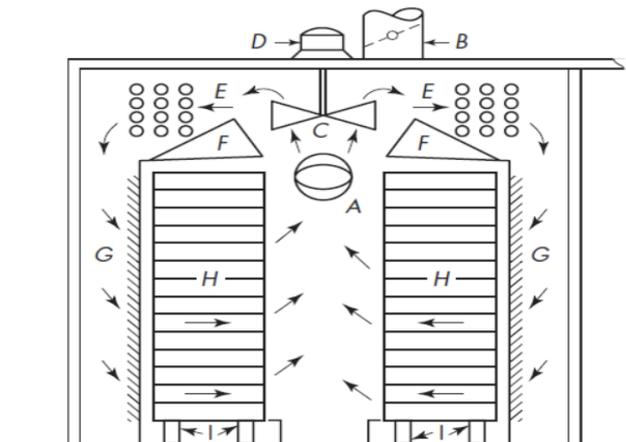
### 2.2.3 CLASIFICACIÓN DE SECADORES DE ALIMENTOS

Se puede clasificar a los secadores considerando varios parámetros sin embargo el más generalizado es el que considera el método de transmisión de calor en el sólido húmedo (Perry & Chilton, 1986). Considerando los mecanismos de transferencia de calor los secadores pueden ser directos o indirectos.

#### 2.2.3.1 SECADORES DIRECTOS O CONVECTIVOS

El mecanismo de transmisión de calor es por convección, en el que el alimento se encuentra en contacto directo con el gas, el cual se puede calentar por radiación solar, resistencia eléctrica, vapor de agua, etc. Entre los más importantes que pertenecen a este grupo están:

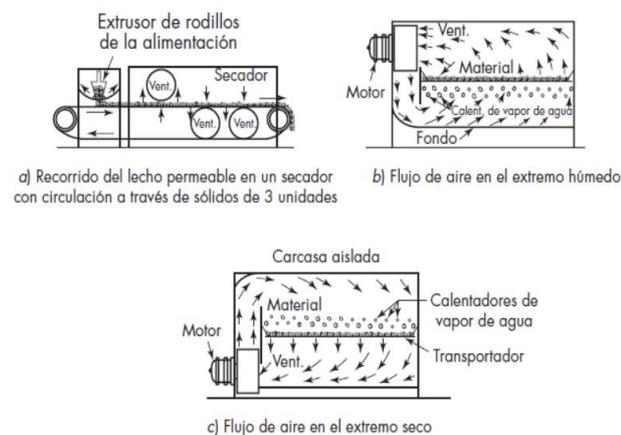
**Secador de bandejas:** Como su nombre lo indica, básicamente consiste en colocar el producto en bandejas, y hacer circular el aire con la ayuda de un ventilador, su operación es discontinua, por lo que su costo es elevado. Se la utiliza cuando la velocidad de producción es menor de 25 a 50 kg/h (Portilla & Bracero, 1992), y presenta como inconveniente que la corriente del aire no es uniforme (figura 8).



**Figura 8. Secador de bandejas por platos perforados**

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

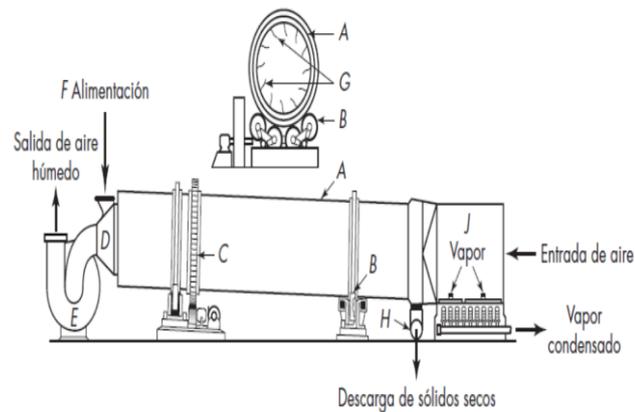
**Cinta transportadora:** Se caracterizan básicamente porque la circulación del aire es continua, y el flujo del aire es paralelo o transversal al producto (figura 13).



**Figura 9. Secadores de cinta transportadora**

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

**Secador rotativo:** Este tipo de secador consiste en una canasta cilíndrica giratoria bajo una inclinación ligera, en donde el producto húmedo se alimenta y descarga por los extremos del cilindro, y el aire puede circular en dirección paralela o contracorriente (figura 10).



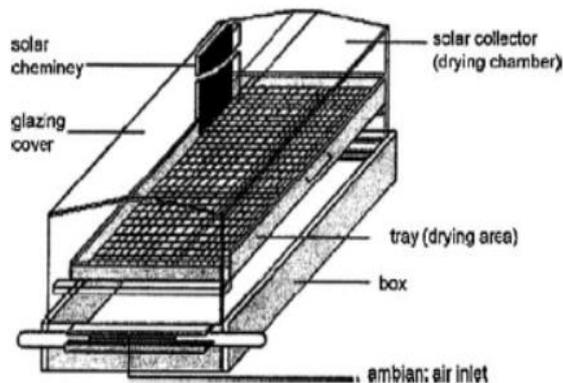
**Figura 10. Secador rotativo**

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

**Secadores solares:** Son aquellos en los que su fuente de energía es la radiación solar incidente, o el proceso de secado se realiza por medio de ella, estos pueden ser clasificados como un secado natural o artificial, el primero de ellos consiste en exponer el producto a secar a la radiación solar, este método es el más antiguo que existe para el secado de productos alimenticios.

El secado artificial comprende aquellos que por medio de un dispositivo captan la radiación solar y la transforman en calor, para que a su vez el fluido secante se caliente y comience el proceso de secado, a estos se los puede clasificar en: Secadores solares directos, Secadores solares indirectos, secadores solares híbridos.

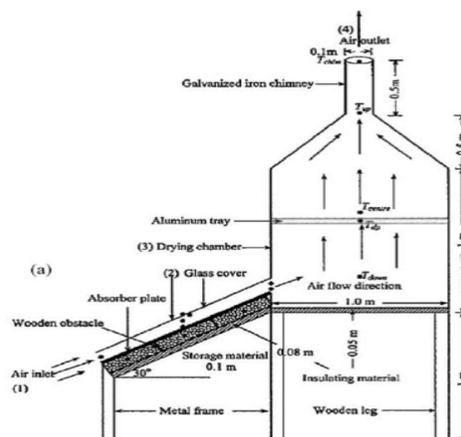
Secador solar directo, generalmente este tipo de secadores usan un gabinete, que a su vez es un colector solar en donde la irradiación captada por el gabinete, calienta el aire contenido en el mismo y provocando así el secado del sólido, en otras palabras la radiación solar cae directamente sobre el sólido (figura 11).



**Figura 11. Secador solar directo**

Fuente: (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010)

Secadores solares indirecto, son aquellos en los que el alimento no está en contacto directo con la radiación solar, y el proceso de secado se lo realiza mediante el calentamiento de un gas desecante el cual es el encargado de retirar el agua del mismo, además este tipo de secadores utilizan como medio de transferencia de calor la convección, la cual puede ser natural (cambio de densidades) o forzada (uso de ventiladores) (figura 12).

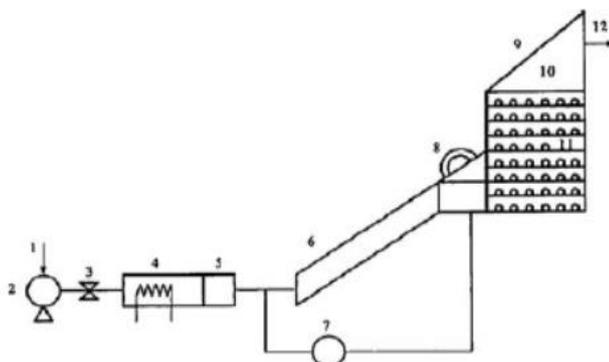


**Figura 12. Secador solar indirecto**

Fuente: (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010)

Secador solar híbrido, comprende aquellos secadores que siendo solares, tienen una fuente alternativa de energía la cual a su vez puede ser

proporcionada por una resistencia eléctrica, la quema de un combustible, gases de escape de algún proceso, entre otros lo cual permite que el proceso de secado continúe, aunque la radiación solar no esté presente, además como en el caso de los secadores indirectos la transferencia de calor por convección puede ser forzada o natural (figura 13).



**Figura 13. Secador solar híbrido**

Fuente: (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010)

En la tabla 5 se muestra las ventajas y desventajas que tienen los secadores solares.

**Tabla 5.**

**Ventajas y desventajas de los tipos de secadores solares**

| Clasificación                     | Ventajas   | Desventajas                                       |
|-----------------------------------|--|---|
| <b>Secadores directos</b>         | -Simples<br>-Bajo costo de construcción y operación  | -Baja capacidad                                   |
| <b>Secadores indirectos</b>       | -Independiente de las condiciones ambientales<br>-Periodos de secado cortos que los directos     | -Más caros y complejos que los secadores directos |
| <b>Secadores solares híbridos</b> | -Capacidad para operar sin sol<br>-Puede ser más rápido que los secadores directos e indirectos. | -Caros  |

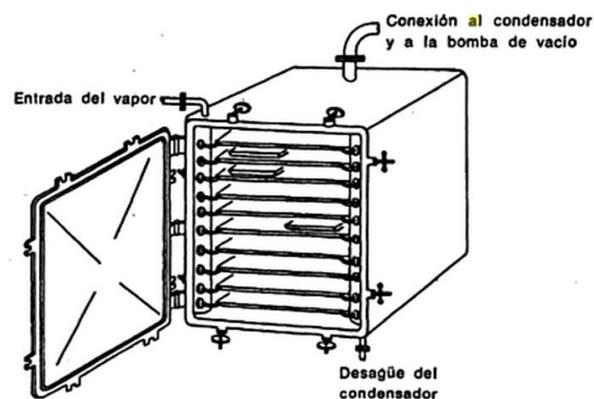
Fuente: (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010)

### 2.2.3.2 SECADORES POR CONDUCCIÓN O INDIRECTOS

Este tipo de secadores se diferencian de los directos por la forma de transferencia de calor (por conducción) y la separación del vapor. Entre los

más importantes que pertenecen a este grupo están: Secadores al vacío, secador de tornillo sin fin, secador de rodillo, etc.

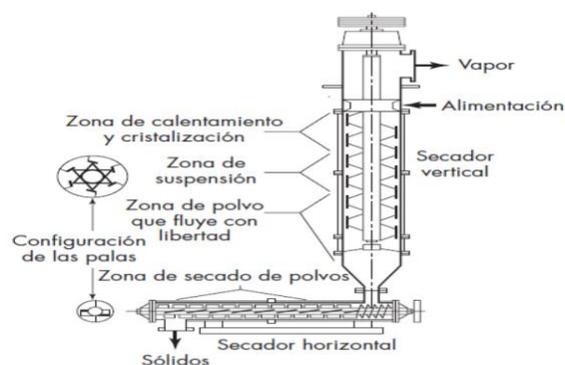
**Secador al vacío:** Su principal característica es que trabaja a bajas temperaturas, en ausencia de oxígeno, por lo general para el secado utilizan menos energía térmica y el tiempo de secado es menor con relación con otros procesos. Entre las áreas que utilizan este proceso figuran la química, farmacéutica, cosméticos, etc (figura 14).



**Figura 14. Secador de bandejas al vacío**

Fuente: (Nonhebel & Moss, 1979)

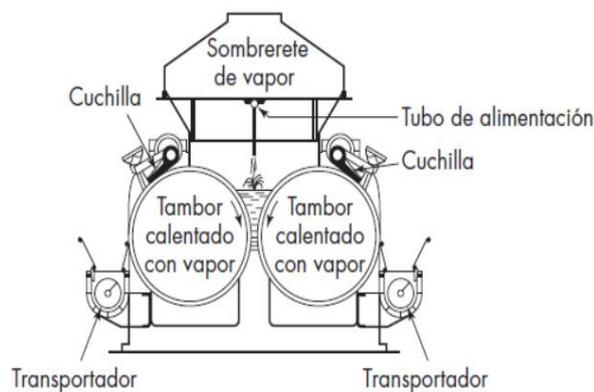
**Secador de Tornillo sin fin:** El secado se lo realiza de forma continua y está compuesto de una carcasa cilíndrica encamisada que contiene en su interior un tornillo sin fin. El material se traslada por la zona caliente hasta su descarga (figura 15).



**Figura 15. Secador tornillo sin fin**

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

**Secador de Rodillo:** Consiste en someter el producto que se desea seca a través de rodillos calientes, el cual se irá evaporando a medida que estos giren, se lo utilizan en elementos que tengan una forma continua como el papel, telas, etc (figura 16).



**Figura 16. Secador tornillo sin fin**

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

## 2.3 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es una energía transportada hacia la superficie terrestre mediante ondas electromagnéticas provenientes del sol, el cual es una fuente a alta temperatura, que se comporta similar a un cuerpo negro irradiando energía a una temperatura aproximada de 6000 °K. El sol emite un conjunto de longitudes de ondas denominadas espectro solar, estas no necesitan de un medio material para propagarse pudiendo atravesar el vacío del espacio. En la aplicación de energía térmica se utiliza la radiación ultravioleta, visible y la infrarroja.

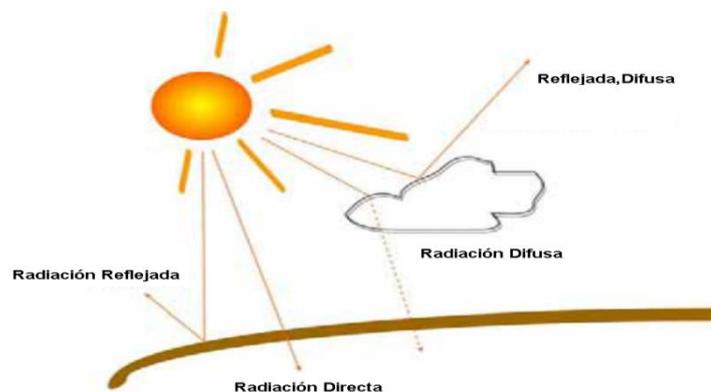
La radiación solar está compuesta por:

**Radiación directa:** Es la que proviene directamente del sol sin perturbaciones o alteración alguna, suponiendo esta el 90% de la radiación global, y prácticamente nula en días cubiertos (IBARRA, 2013).

**Radiación difusa:** Es la radiación que es dispersada por la atmósfera, es decir la que nosotros percibimos.

**Radiación reflejada:** Como su nombre lo indica es aquella que se refleja sobre una superficie inclinada, también se la conoce con el nombre de albedo.

**Radiación global:** Está compuesta por la radiación directa y difusa.



**Figura 17. Radiación solar y sus componentes**

Fuente: (ALTERNER, 2004)

Para expresar la potencia solar y en general de cualquier radiación se utiliza el término irradiancia. La irradiancia,  $W/m^2$ , es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. (ITESCO, 1995).

Para la medición de la radiación solar existen básicamente dos tipos de instrumentos piranómetro y pirheliómetro, ambos basados en la generación de un voltaje proporcional a la radiación solar incidente (MONTERO, 2005)

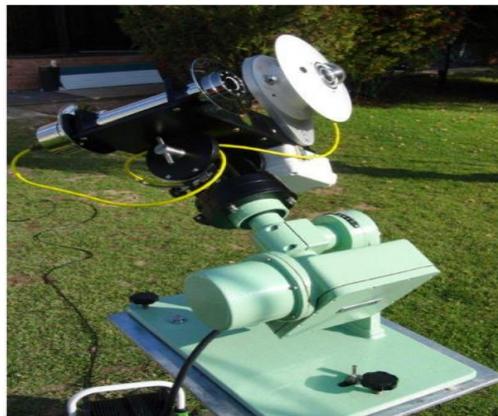
**Piranómetro:** Es un instrumentos que se usa para medir la radiación global sobre una superficie plana, el cual utiliza sensores que convierten la radiación en una señal eléctrica de voltaje que es proporcional a la incidencia de la misma (figura 18).



**Figura 18. Piranómetro**

Fuente: (SENSOVANTE, 2015)

**Pirheliómetro:** Es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa por lo que debe disponer de un sistema de seguimiento del sol para que su superficie receptora sea normal a los rayos solares (MONTERO, 2005).



**Figura 19. Pirheliómetro**

Fuente: (FCH, 2015)

### 2.3.1 GEOMETRÍA SOLAR

Los ángulos solares son de suma importancia para establecer el valor estimado de la radiación solar que llega a un plano inclinado (colector, panel solar, etc), también permite realizar un análisis previo de posibles problemas de sombra en la superficie de captación de energía, estos ángulos son (REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR, 2015):

**Ángulo horario ( $\omega$ ):** Corresponde al desplazamiento angular del sol con respecto al meridiano local debido a la rotación de la tierra, este cambio es de 150/hora.

**Ángulo de incidencia de radiación directa ( $\theta$ ):** Es el ángulo formado entre la normal a la superficie y la recta determinada por la dirección de la radiación solar directa, la variación de este ángulo es de  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ .

**Inclinación ( $\beta$ ):** Es el ángulo formado por el plano inclinado y su correspondiente plano horizontal.

**Ángulo azimut de superficie ( $\gamma$ ):** Corresponde al ángulo formado entre la dirección norte-sur y la proyección en el plano horizontal de la recta normal a la superficie colectora y medido a partir del sur ( $\gamma=0$ ). Su valor está entre  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**Latitud ( $\phi$ ):** Corresponde a la posición angular en relación a la línea del Ecuador, considerada latitud 0.

**Declinación ( $\delta$ ):** Posición angular del sol al medio día con respecto a la línea ecuatorial, el cual puede variar de  $23.5^\circ$  (solsticio de verano) y  $-23.45^\circ$  (solsticio de invierno)

## 2.4 PROPIEDADES DE RADIACIÓN

La mayoría de las superficies encontradas en la práctica no se comportan como cuerpos negros, para determinar las características de las propiedades de superficies no opacas, se utilizan cantidades adimensionales tales como la emisividad, la absorptancia y la transmitancia a fin de relacionar las capacidades de emisión, absorción y transmisión de una superficie con las de un cuerpo negro (KREITH y BOHN, 2001).

### 2.4.1 EMISIVIDAD

La emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, la emisividad de una superficie

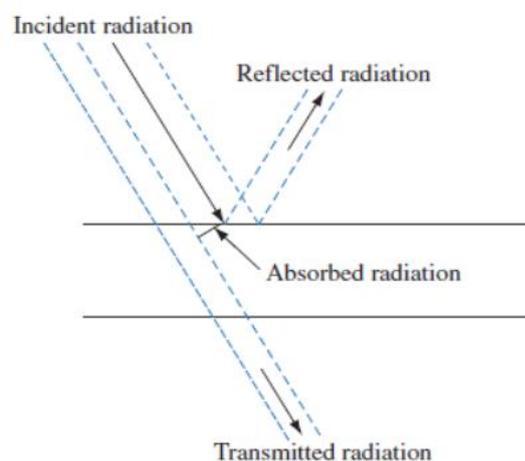
varía entre 0 y 1, la cual es una medida de cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro donde su emisividad es igual a 1 (CENGEL y GHAJAR, 2011).

#### 2.4.2 ABSORTIVIDAD

La absorptividad es una propiedad que determina la fracción de la irradiación absorbida por una superficie su valor está comprendido entre el rango de 0 a 1, un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es un absorbente perfecto ( $\alpha=1$ ) (INCROPERA,1999).

#### 2.4.3 TRASMITANCIA Y REFLECTANCIA

Cuando una superficie no absorbe toda la radiación incidente, la parte no absorbida será transmitida o reflejada, la mayoría de los sólidos son opacos y no transmiten radiación, la fracción de radiación que no se absorbe es por consiguiente reflejada de vuelta hacia el espacio hemisférico (KREITH y BOHN, 2001).



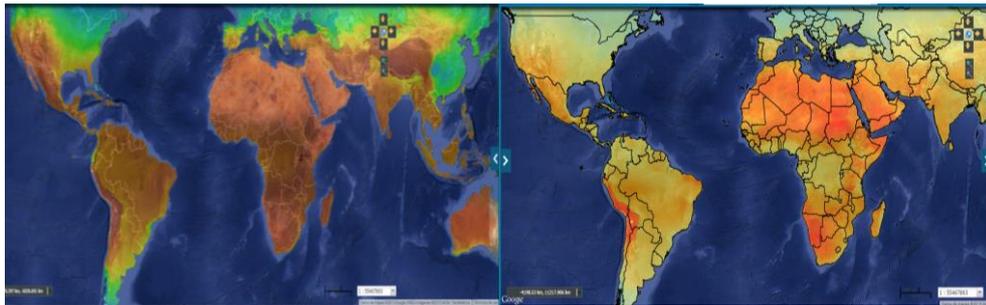
**Figura 20. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.**

FUENTE: (Kreith, Manglik, & Bohn, 2012)

## 2.5 ENERGÍA SOLAR EN EL ECUADOR

Al encontrarse el Ecuador atravesado por la línea ecuatorial dispone de un alto potencial energético solar, el mismo que es utilizado en varias aplicaciones como: el calentamiento de agua sanitaria, secado de productos

agrícolas, generación eléctrica, etc. Debido a que en los últimos años que ha incrementado el uso tecnologías en donde la fuente de energía es el sol, se ha elaborado el atlas solar del Ecuador (CONCELEC), el cual está dividido por provincias en donde se encuentra la isolación directa, difusa y global para cada mes del año.

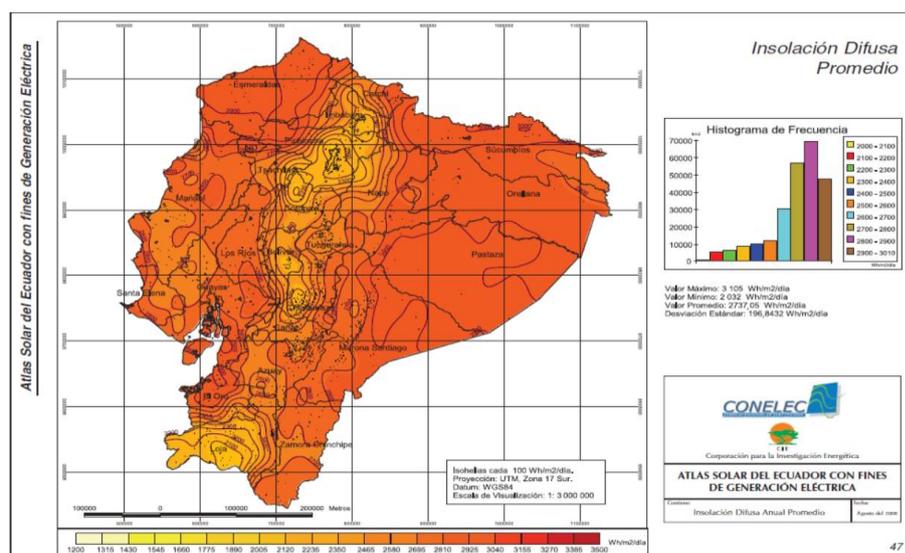


**Figura 21. Mapa global de irradiación solar**

Fuente: (International Renewable Energy Agency, 2015)

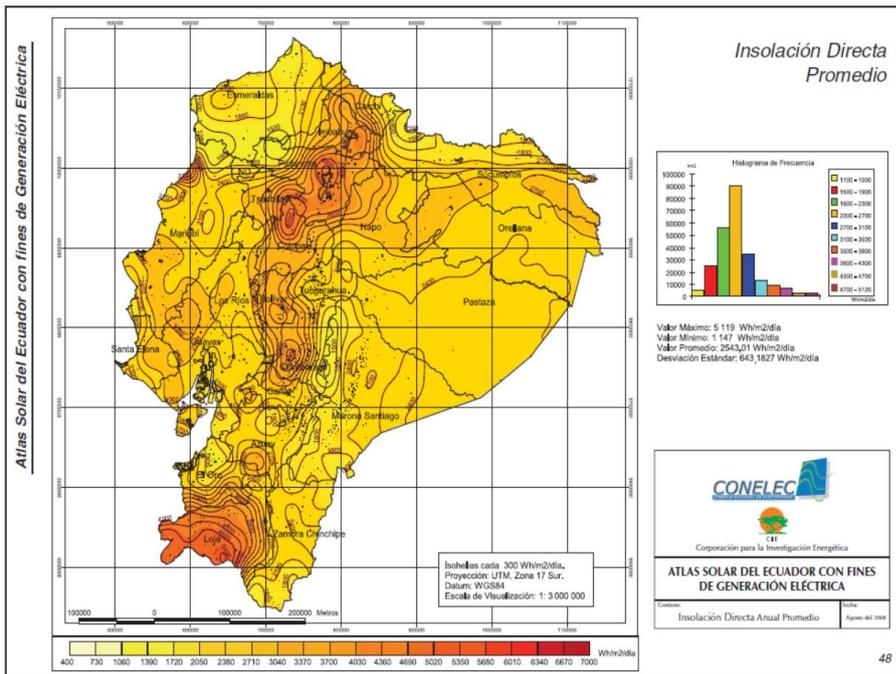
Como se puede apreciar en la figura 21 el Ecuador se encuentra entre los países donde la radiación es alta, con relación a otros países en el mundo, aproximadamente la irradiación solar en nuestro país es  $210 \text{ W/m}^2$ .

En la figura 22,23, 24 se muestra la radiación promedio difusa, directa y global para el Ecuador respectivamente.



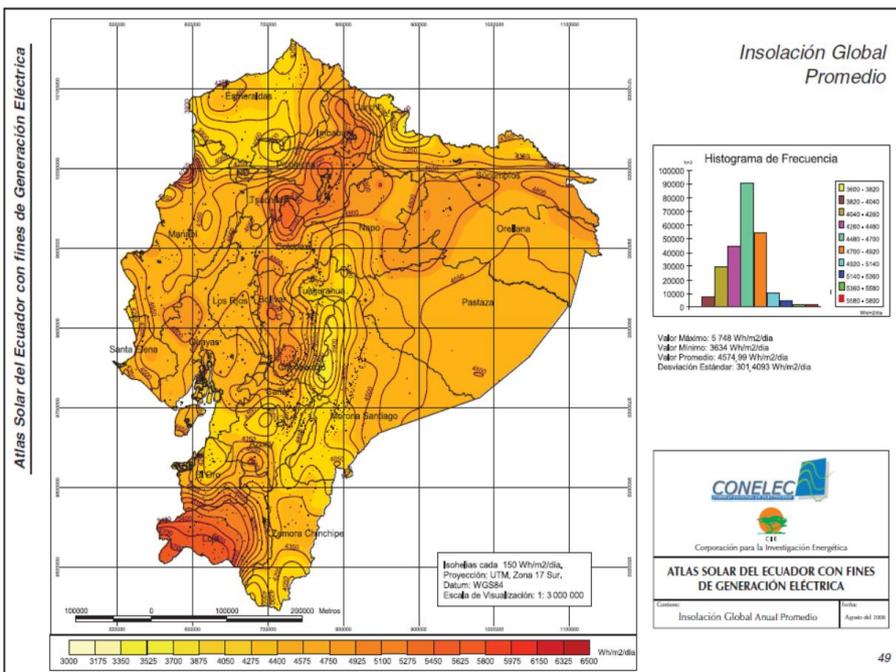
**Figura 22. Insolación Difusa Promedio**

Fuente: (Consejo Nacional de Electricidad, 2008)



**Figura 23. Insolación Directa Promedio**

Fuente: (Consejo Nacional de Electricidad, 2008)



**Figura 24. Insolación Global Promedio**

Fuente: (Consejo Nacional de Electricidad, 2008)

## 2.6 RADIACIÓN SOLAR Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS DEL CABUYAL

El presente proyecto es desarrollado en la comunidad del Cabuyal, perteneciente a la provincia del Carchi, debido a que las condiciones meteorológicas, geográficas e insolación solar son importantes para el dimensionamiento del sistema de secado, para así determinar las condiciones de operación a las cuales va a ser sometido.

**Ubicación geográfica:** La comunidad del Cabuyal se encuentra al norte a  $0^{\circ} 34' 58.8''$  y al oeste a  $78^{\circ} 7' 35.1''$ , en la tabla 6 se detallada de la ubicación del Cabuyal.

**Tabla 6.**

### Ubicación de la Comunidad del Cabuyal

| País      | Ecuador       | Ubicación cartográfica |
|-----------|---------------|------------------------|
| Región    | Sierra        |                        |
| Provincia | Carchi        |                        |
| Parroquia | Juan Montalvo |                        |
| Latitud   | 0.583         |                        |
| Longitud  | -78.126       |                        |

Fuente: (UBICA, 2014)

El Cabuyal está una altura de 1400 m.s.n.m, en la tabla 7 se muestran las condiciones meteorológicas e insolación:

**Tabla 7.**

### Condiciones meteorológicas de superficie e insolación para el Cabuyal

| Mes               | Presión | Velocidad del viento | Temperatura ambiente | Humedad relativa del aire | Insolación (0°)          | Insolación (15°)         |
|-------------------|---------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                   | (kPa)   | (m/s)                | (°C)                 | (%)                       | (kWh/m <sup>2</sup> día) | (kWh/m <sup>2</sup> día) |
| Ene               | 87.6    | 2.33                 | 19.9                 | 80.3                      | 3.96                     | 4.06                     |
| <b>Continúa →</b> |         |                      |                      |                           |                          |                          |

|            |      |      |                 |      |      |      |
|------------|------|------|-----------------|------|------|------|
| <b>Feb</b> | 87.6 | 1.93 | 20.3            | 78.8 | 4.09 | 4.10 |
| <b>Mar</b> | 87.6 | 1.87 | 20.6            | 77.6 | 4.34 | 4.23 |
| <b>Abr</b> | 87.6 | 2    | 20.9            | 74.6 | 4.17 | 4.10 |
| <b>May</b> | 87.7 | 2.21 | 21.2            | 67.6 | 3.91 | 3.93 |
| <b>Jun</b> | 87.7 | 2.70 | 21              | 61.7 | 3.80 | 3.86 |
| <b>Jul</b> | 87.8 | 2.92 | 21.1            | 54.4 | 4.03 | 4.08 |
| <b>Ago</b> | 87.8 | 2.99 | 21.9            | 50.8 | 4.05 | 4.02 |
| <b>Sep</b> | 87.7 | 2.89 | 22              | 57.3 | 3.88 | 3.76 |
| <b>Oct</b> | 87.7 | 2.79 | 21.3            | 66.5 | 3.86 | 3.82 |
| <b>Nov</b> | 87.6 | 2.7  | 20.3            | 75.2 | 3.74 | 3.80 |
| <b>Dic</b> | 87.6 | 2.66 | 19.9            | 80.6 | 3.69 | 3.80 |
|            |      |      | <b>Promedio</b> |      |      |      |
|            | 87.7 | 2.5  | 20.9            | 68.7 | 3.96 | 3.96 |

Fuente: (Stackhouse, 2015)

## 2.7 COLECTOR SOLAR PLANO

Un colector solar es un elemento que transforma la luz solar (radiación) en calor, es el medio entre el cual la energía solar es transferida por convección a un fluido de trabajo (aire, agua, etc.), el cual a su vez está destinado a realizar un determinado proceso, en el caso del secado, el aire es el encargado de ganar calor al atravesar por el colector para posteriormente realizar el secado de los alimentos. Los colectores solares planos son los más usados para el secado de alimentos, porque este tipo de colectores funcionan tanto con radiación directa y difusa, además no requieren movimiento continuo para seguir la trayectoria del sol, su construcción, análisis matemático y mantenimiento son más simples y económicos que otro tipo de colectores.

Las partes principales que componen un colector solar plano son las siguientes:

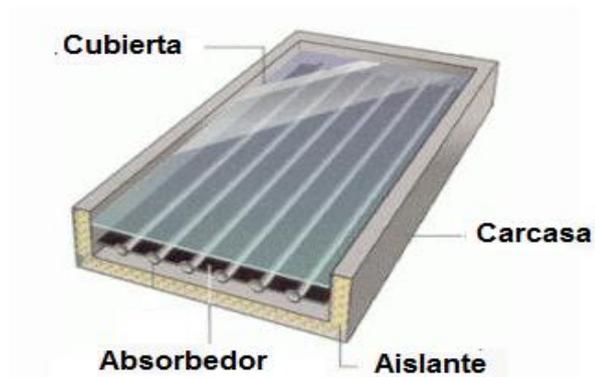
**Cubierta transparente:** La cubierta es un elemento que permite el paso de la radiación solar de onda corta, el cual debe ser lo suficientemente transparente y a la vez opaca para que la radiación de onda larga producida por la placa absorbidora no se dispersa al exterior

inmediatamente, por lo tanto debe ser de un material semitransparente, por lo general es usado el vidrio, pero para ciertas aplicaciones se usan cubiertas de materiales plásticos que tenga similares características que el vidrio.

**Placa absorbadora:** Es la parte encargada de absorber la radiación solar incidente que atraviesa la cubierta del colector para así calentarse y generar calor que es transferido al fluido de trabajo, la superficie que está en contacto directo con los rayos solares está recubierta con pintura de color negro para así lograr la mayor absorción de radiación. El material debe tener una buena conductividad térmica por lo general se utiliza metales como el aluminio, hierro, cobre, acero, etc. En los últimos años se ha visto la utilización de materiales que permiten el almacenamiento de la energía absorbida sin necesidad de que estos materiales tenga una buena conductividad térmica, pero si una capacitancia elevada.

**Aislante:** Se encuentra ubicada entre la carcasa y la placa absorbadora y tiene como función minimizar las pérdidas de calor hacia la parte exterior del colector, para lo cual se escoge materiales que tengan una baja conductividad térmica y dependiendo de la operación del colector que soporten altas temperaturas por lo general se usa lana de vidrio, poliestireno expandido, poliuretano, materiales orgánicos como la paja, lana de oveja, cabello humana entre otras.

**Carcasa:** Cumple la función de contener a los elementos que conforman el colector anteriormente mencionados, el cual debe ser fabricado de materiales que sean de larga duración, económicos, resistentes a las condiciones ambientales a las cuales va estar operando el colector.

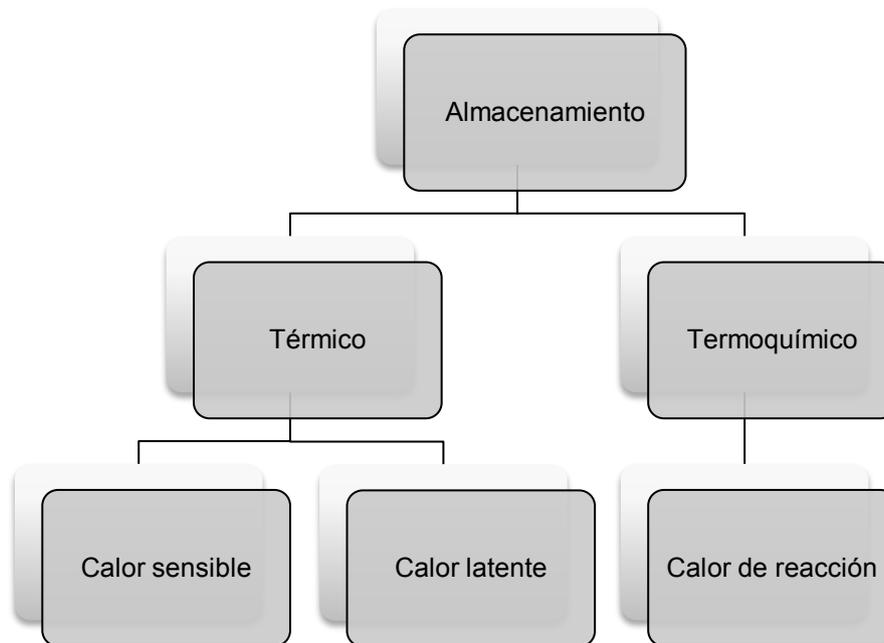


**Figura 25. Elementos de un colector solar**

Fuente: (Herrera & Montenegro, 2014)

## **2.8 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

En el almacenamiento de energía en forma de calor, podemos considerar dos tipos de almacenamiento: Térmicos y termoquímicos. En el primer caso tenemos el almacenamiento de energía en forma de calor sensible o calor latente. En los sistemas de almacenamiento de calor sensible, la energía térmica se almacena mediante el aumento de la temperatura de un sólido o líquido. Estos sistemas utilizan la capacidad calorífica (es decir la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia) y el cambio en la temperatura del material durante el proceso de carga y descarga. La cantidad de calor almacenado depende del calor específico del medio, la temperatura y la cantidad de material de almacenamiento (FARIÑA et al, 2009).



**Figura 26. Almacenamiento de energía**

Fuente: (Farinha, Joyce, Giestas, Horta, & Brites, 2009)

Sistemas de almacenamiento de calor latente se basan en el calor absorbido o liberado cuando un material de almacenamiento sufre un cambio de fase de sólido-líquido o líquido a gaseoso.

Los sistemas de almacenamiento termoquímicos se basan en la energía absorbida y liberada en la ruptura de enlaces moleculares y la formación de una reacción química reversible. En este caso, el calor almacenado depende del material de almacenamiento, el calor de reacción y el grado de conversión de la reacción (FARIÑA et al, 2009).

## 2.9 NUMÉRO DE BIOT

El número de Biot proporciona una medida de la caída de temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido (INCROPERA,1999), es descrito como la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción del calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor (CENGEL,2004), lo que permite establecer un diámetro adecuado para que la distribución de temperaturas sea uniforme en el interior del cuerpo, esto ocurre cuando es menor 0.1.



**Figura 27. Número de Biot**

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

## 2.10 CONVECCIÓN NATURAL

La convección natural, o libre, se observa como resultado del movimiento del fluido debido a los cambios de la densidad que resultan del proceso de calentamiento. El movimiento del fluido en la convección natural, ya sea un gas o un líquido, resulta de las fuerzas de flotabilidad impuestas sobre el fluido cuando su densidad en la proximidad de la superficie de transferencia de calor disminuye como consecuencia del proceso de calentamiento. Las fuerzas de flotabilidad no estarían presentes si sobre el fluido no actuase un campo de fuerzas exterior como la gravedad. Las fuerzas de flotabilidad que originan las corrientes de convección natural son fuerzas de volumen (HOLMAN, 1998)

## 2.11 CONVECCIÓN FORZADA

(Incropera & Dewitt, 1999) menciona que:

“ La convección forzada tiene lugar cuando el fluido es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos”.

(Holman, 1998) afirma que:

“ El gradiente de temperaturas depende de la rapidez a la que el fluido se lleva el calor; una velocidad alta produce un gradiente de temperaturas grande, etc.”

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO

En el presente capítulo se realiza el dimensionamiento considerando parámetros operativos, datos de la zona y fórmulas matemáticas para el cálculo de las dimensiones de la cámara de secado, calor mínimo requerido, flujo de calor requerido para el secado del ají, flujo másico de aire para el proceso, caídas de presión, tiro de la chimenea, etc. Se analizará la influencia que tienen en el diseño del sistema de secado.

#### 3.1 DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO

##### 3.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO

El dimensionamiento de la cámara de secado, se lo realiza considerando los siguientes parámetros y condiciones de funcionamiento:

- Se considera que las condiciones de funcionamiento del secador no cambian durante el proceso de secado, (temperaturas, flujo de aire dentro del secador y humedad del Cabuyal), ya que se utilizan valores promedios.
- La temperatura dentro de la cámara de secado es igual a la temperatura de salida del colector ( $T_u = 57^{\circ}\text{C}$ ).
- La temperatura de las paredes de la cámara de secado es igual a la temperatura ambiente dentro de la cámara, siendo este un criterio conservador.
- El coeficiente de transferencia de calor en la superficie externa de la cámara es uniforme y constante durante el proceso.
- La humedad relativa del aire a la salida de la cámara de secado es del 90%.
- El porcentaje de humedad a la cual se considera que el ají está seco se encuentra entre el 8 al 13% (McCabe, Smith, & Harriot, 2007), debido a esto el contenido de humedad que se desea llegar es del

10%, el cual es un valor adecuado para el almacenamiento y procesamiento del ají en su siguiente etapa.

- La temperatura superficial del ají dentro de la cámara de secado ( $T_i$ ), es de 55 °C, puesto que se evita que la humedad en el interior del producto quede atrapada, por un colapso de sus poros (Hernández , Quinto, Cuevas, Acosta, & Aguilar, 2008).
- La capacidad de diseño del secador es de 25 kg ( $M_T$ ).
- La humedad inicial en base húmeda es del 87%, determinada mediante el método gravimétrico indirecto por desecación.
- Tiempo de secado mínimo requerido es de 33 (h).

### 3.1.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO Y BANDEJAS

La dimensión mínima necesaria para la cámara de secado puede ser determinada por la siguiente expresión (Food and agriculture organization of the United Nations, 2015):

$$A_{mcs} = \frac{M_T}{\rho_{aji} * \delta_{Laji}} \quad (6)$$

Dónde:

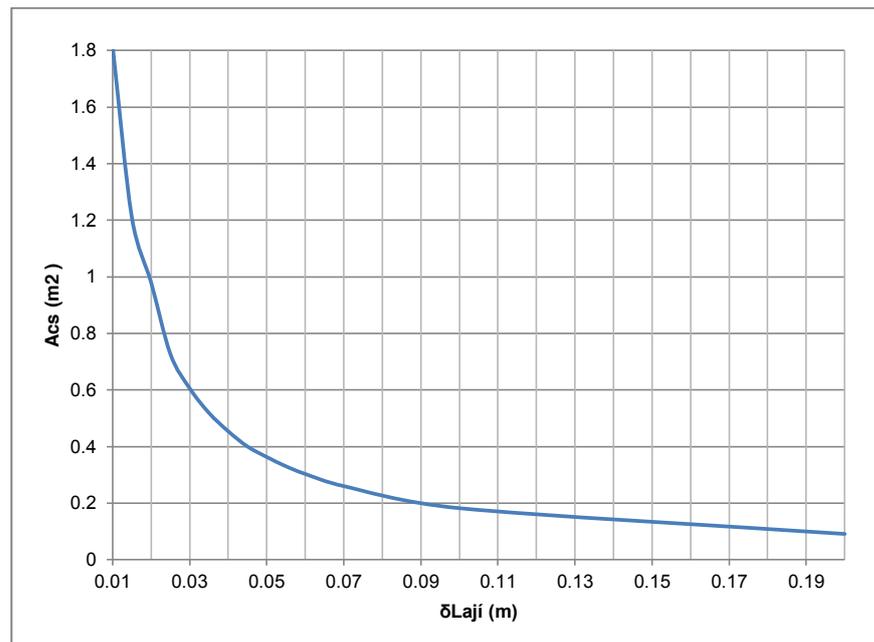
$A_{mcs}$  = Área mínima de la cámara de secado ( $m^2$ )

$M_T$  = Capacidad total del secador (kg)

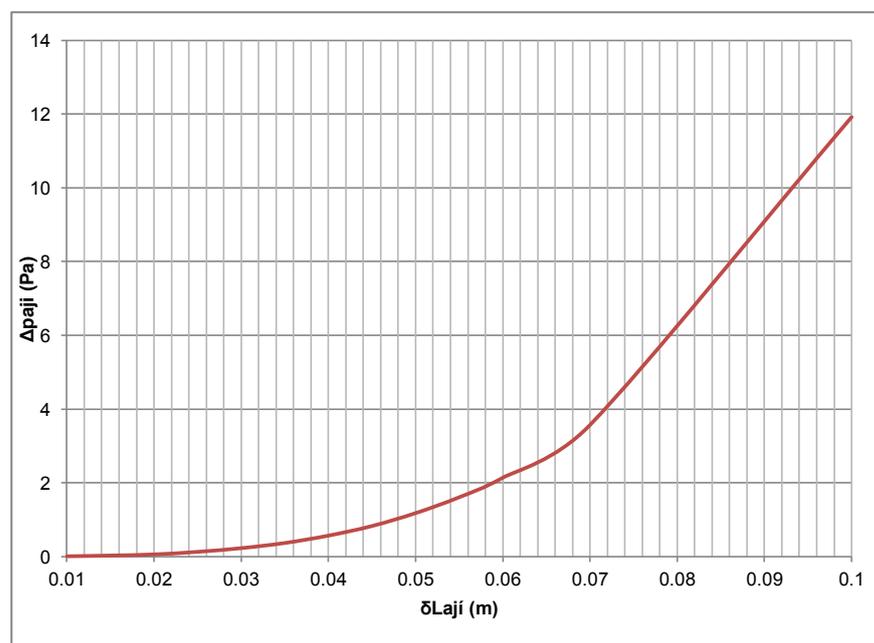
$\rho_{aji}$  = Densidad del ají ( $kg/m^3$ )

$\delta_{Laji}$  = Espesor del lecho de ají (m)

(Palomino, Váquiro, Salamanca, & Hurtado, 2005) estudiaron las propiedades térmicas del capsicum annum, obteniendo que la densidad del ají es de ( $1270 kg/m^3$ )



**Figura 28. Variación del área de la cámara de secado en función del espesor del lecho de ají**



**Figura 29. Influencia del espesor del lecho de ají en la caída de presión**

En la figura 28 y 29 se observa que a mayor espesor del lecho del producto, el área disminuye y el número de bandejas aumenta, además el número de Reynolds en el lecho es mayor lo cual incrementa las caídas de

presión, en cambio para espesores más pequeños el área y el número de bandejas crecen, pero las caídas de presión son menores, sin embargo se debe encontrar un espesor del lecho que nos permita obtener un equilibrio tanto dimensional como operativo es decir que las caídas de presión no sean tan elevadas.

Debido a que se desea conocer un espesor que permita trabajar con las menores pérdidas de presión en un área determinada y con una cantidad de bandejas adecuadas, que cubra la capacidad de 25 kg, para obtener la alternativa que satisfaga a los requerimientos antes mencionados se utiliza el método de distribución de puntos ponderados, “el cual consiste en realizar una matriz de puntuación que permite hacer un estudio más detallado de cada alternativa frente a los criterios especificados” (Hill, 1970,p.42).

Este método permite asignar a cada criterio un peso ponderado (WF), con la ayuda de una matriz , en donde se coloca en orden de importancia a los criterios de evaluación y se compara con todas las alternativas, estableciendo una escala de evaluación, que para este caso el valor de 1 indicara que el parámetro tiene mayor relevancia en relación al otro, 0.5 para parámetros de igual importancia o similares condiciones y para los de menor relevancia se asigna el valor de 0.

Para elegir la mejor alternativa se debe realizar una matriz en donde asigna una calificación que indica el nivel de satisfacción de la alternativa, es decir,colocando un factor de calificación (RF) para cada uno de los criterios de evaluación, el rango considerado para estas calificaciones se encuentra del 1 al 10, en donde se consideran las siguientes calificaciones:

- 1 a 2 malo
- 3 a 5 regular
- 6 a 8 bueno
- 9 a 10 muy bueno

Una vez determinado el weighting factor (WF) se debe multiplicar cada criterio de evaluación con su respectivo rating factor (RF), obteniendo así una calificación de cada alternativa, en donde el mayor puntaje de la suma de las calificaciones indicará la alternativa que más se acerque al objetivo, esto se puede apreciar de mejor forma en la tabla 8.

**Tabla 8.**

**Matriz de pesos ponderados para el espesor del lecho**

|   |                                 | Espesor del lecho |                 |             |                  |             |                  |             |
|---|---------------------------------|-------------------|-----------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
|   |                                 |                   | $\delta = 0.07$ |             | $\delta = 0.045$ |             | $\delta = 0.025$ |             |
|   | Criterio de evaluación          | W.F.              | R.F.            | Calif.1     | R.F.             | Calif.2     | R.F.             | Calif.3     |
| 1 | Caídas de presión               | 0.21              | 5               | 1.07        | 7                | 1.50        | 10               | 2.14        |
| 2 | Área                            | 0.21              | 8               | 1.71        | 7                | 1.50        | 2                | 0.43        |
| 3 | No. Bandejas                    | 0.20              | 5               | 0.98        | 9                | 1.77        | 4                | 0.79        |
| 4 | Velocidad del aire              | 0.13              | 1               | 0.13        | 8                | 1.00        | 5                | 0.63        |
| 5 | Energía necesaria para calentar | 0.13              | 3               | 0.38        | 7                | 0.88        | 1                | 0.13        |
| 6 | Distribución del aire           | 0.05              | 1               | 0.05        | 6                | 0.32        | 9                | 0.48        |
| 7 | Uniformidad del secado          | 0.07              | 1               | 0.07        | 6                | 0.43        | 9                | 0.64        |
|   |                                 | 1.00              |                 | <b>4.39</b> |                  | <b>7.39</b> |                  | <b>5.23</b> |

Como se puede apreciar en la tabla 9 el espesor del lecho más apropiado para nuestro diseño es de 0.045 mm lo cual obtuvo el mayor puntaje, las matrices de puntos ponderados se encuentran en el anexo H.

Con la ecuación 6 se calcula el área de la cámara de secado mínima

$$A_{csm} = \frac{25}{1270 * 0.045}$$

$$A_{csm} = 0.43 \text{ m}^2$$

Las dimensiones recomendadas para las bandejas por la FAO, son una profundidad no mayor a 1.5 m y un ancho máximo de 1 m, para una capacidad que este entre 20-35 kg, debido a que las bandejas y la cámara de secado tienen las mismas dimensiones se considera, una área mayor a la establecida anteriormente, escogiendo así una profundidad de 1.2 m y un ancho de 0.6 m, con lo cual el área es:

$$A_{cs} = B_{cs} * D_{cs} \quad (7)$$

$$A_{cs} = 0.6 * 1.2$$

$$A_{cs} = 0.72 \text{ m}^2$$

Dónde:

$A_{cs}$  = Área de la cámara de secado ( $\text{m}^2$ )

$B_{cs}$  = Ancho de la cámara de secado (m)

$D_{cs}$  = Profundidad de la cámara de secado (m)

Para obtener el número adecuado de bandejas, se determinó la masa que ocupa el espesor del lecho seleccionado, para un área de muestra de 0.15 x 0.15 m, obteniéndose un valor de 191 g de ají, con lo que se establece la masa de ají por unidad de área con la siguiente ecuación:

$$M_{ab} = \frac{m_{ab}}{A_{ab}} \quad (8)$$

$$M_{ab} = \frac{0.191}{0.15 * 0.15}$$

$$M_{ab} = 8.48 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Dónde:

$M_{ab}$  = Masa de la muestra por unidad de área ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$m_{ab}$  = Masa de la muestra (kg)

$A_{ab}$  = Área de la muestra ( $\text{m}^2$ )

De donde la masa por bandeja es:

$$m_{AB} = A_{cs} * M_{ab} \quad (9)$$

$$m_{AB} = 0.72 * 8.488$$

$$m_{AB} = 6.11 \text{ kg}$$

Dónde:

$m_{AB}$  = Masa total por bandeja (kg)

$A_{CS}$  = Área de la bandeja ( $\text{m}^2$ )

El número de bandejas está dado por la razón entre la capacidad del secador y la masa individual por bandeja, de lo que se obtiene que:

$$N_b = \frac{M_T}{m_{AB}} \quad (10)$$

$$N_b = \frac{25}{6.11}$$

$$N_b = 4$$

Dónde:

$N_b$  = Número de bandejas

$M_T$  = Capacidad total del secador (kg)

$m_{AB}$  = Masa total por bandeja (kg)

La separación entre bandejas, juega un papel importante puesto que el coeficiente de transferencia de calor, depende de la geometría del sistema y la velocidad del gas al atravesar la superficie de evaporación, es decir que a medida que el espaciamiento aumenta, la velocidad del gas disminuye porque se produce una expansión luego que el aire haya atravesado el lecho de ají, además el tiempo de secado depende de estos factores, por lo que se recomienda que el espaciamiento entre bandejas sea entre 2-5 pulg (Perry & Chilton, 1986), para lo cual se escoge una separación de 10 cm entre bandejas, además para que el secado se produzca de manera homogénea en todas las bandejas, debe existir un espacio libre de producto en las bandejas de aproximadamente 5 cm, logrando así dejar una cantidad de aire que circule por este espacio sin saturarse de agua.

Es importante mencionar que la dimensión del espacio libre debe ser tal que no influya en la capacidad de entrega de cada bandeja.

En la tabla 9, se indican las dimensiones generales de la cámara de secado.

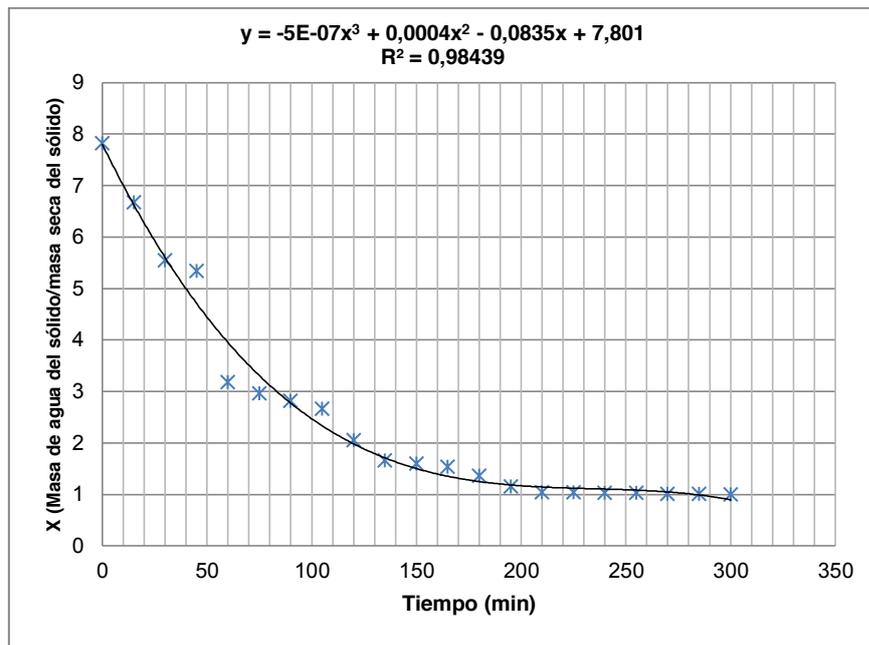
**Tabla 9.**

**Dimensiones generales de la cámara de secado**

| Dimensiones geométricas de la cámara de secado  |                      |
|---|----------------------|
| Profundidad de la cámara de secado ( $D_{cs}$ ) | 1.2 m                |
| Ancho de la cámara de secado ( $B_{cs}$ )       | 0.6 m                |
| Altura de la cámara ( $H_{cs}$ )                | 1.10 m               |
| Distancia entre bandejas                        | 0.1 m                |
| Espacio libre parte inferior                    | 0.15 m               |
| Espacio libre parte superior                    | 0.36 m               |
| Bandejas  | 1.20 x 0.6 x 0.007 m |
| Espesor del tablero de madera                   | 0.01 m               |

### 3.1.3 TIEMPO DE SECADO

Uno de los factores preponderantes en el proceso de secado es la determinación del tiempo mínimo que se requiere para llegar una humedad requerida, para lo cual se parte de la determinación de la curva de velocidad de secado, por lo general esta es obtenida mediante un proceso experimental para el producto que se desea secar, en la figura 30 se muestra la gráfica correspondiente para el ají para una muestra de 2 gr:



**Figura 30. Curva de velocidad de secado del capsicum annum**

La velocidad de secado (McCabe, Smith, & Harriot, 2007) es definida como:

$$R = -\frac{m_{sají} dX}{A_{co} dt} \quad (11)$$

Dónde:

$R$  = Velocidad de secado ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ )

$m_{sají}$  = Masa seca de ají (kg)

$A_{co}$  = Área de contacto ( $\text{m}^2$ )

$\frac{dX}{dt}$  = Variación de la humedad en función del tiempo (1/s)

Puesto que en el tramo de la curva donde la velocidad de secado es constante es decir  $R=R_c$ , el tiempo de secado en este segmento es:

$$t_c = \frac{m_{sají} * (X_{si} - X_{scr})}{A_{co} * R_c} \quad (12)$$

Dónde:

- $t_c$  = Tiempo en el tramo de velocidad constante (s)  
 $X_{si}$  = Humedad en base húmeda inicial del ají (87 %)  
 $X_{scr}$  = Humedad en base húmeda crítica del ají (64%)  
 $R_c$  = Velocidad de secado constante ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ )

Para conocer cuál es el valor de la humedad crítica del ají, es decir donde la velocidad de secado cambia del periodo constante al decreciente, este valor puede ser determinado gráficamente o analíticamente, observando donde la pendiente de la recta disminuye abruptamente, este valor es de aproximadamente el 64%.

Se determina el Área de contacto con la expresión mostrada a continuación:

$$A_{co} = 2 * \frac{M_T}{m_u} * A_u \quad (13)$$

Dónde:

- $m_u$  = Masa unitaria del ají (kg)  
 $A_u$  = Área unitaria del ají ( $\text{m}^2$ )

La masa unitaria y el área unitaria del ají son las siguientes:

$$m_{un} = \rho_{ají} * (\pi * r_{ají}^2 * e_{ají}) \quad (14)$$

$$A_{un} = 2\pi * r_{ají} * e_{ají} \quad (15)$$

Dónde:

- $\rho_{ají}$  = Densidad del ají ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $r_{ají}$  = Radio promedio del ají (0.01 m)  
 $e_{ají}$  = Espesor al cual se corta el ají para el proceso de secado (0.01m)

El área de contacto es:

$$A_{co} = 2 * \frac{25}{1270 * \pi * 0.01^2 * 0.01} * 2\pi * 0.01^2$$

$$A_{co} = 7.89 \text{ m}^2$$

Según (McCabe, Smith, & Harriot, 2007) la velocidad de secado en el periodo constante puede ser descrita con la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{h_y * (T_u - T_i)}{h_{fgi}} \quad (16)$$

Dónde:

- $h_y$  = Coeficiente de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$ )
- $T_u$  = Temperatura de salida del colector ( $\text{°K}$ )
- $T_i$  = Temperatura de la superficie del ají ( $\text{°K}$ )
- $h_{fgi}$  = Entalpia de vaporización a la temperatura  $T_i$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )

(Perry & Chilton, 1986) menciona que cuando el flujo de aire es perpendicular a la superficie del producto a secar, el coeficiente de transferencia de calor es:

$$h_y = 24.156 * G^{0.37} \quad (17)$$

Dónde:

- $G$  = Velocidad de masa del gas desecante ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ )

El valor de la velocidad de masa de gas desecante se la puede determinar con la siguiente relación:

$$G = \frac{\dot{m}_{aire}}{A_{cs}} \quad (18)$$

Dónde:

$m_{aire}$  = Caudal másico de aire (kg/s)

$A_{cs}$  = Área de la cámara de secado

El cálculo del caudal másico de aire requerido se lo encuentra con más detallado en el diseño del colector solar.

La entalpia de vaporización, a la temperatura  $T_i$  se la puede calcular (Bracero & Cabezas, 1992):

$$h_{f_{gi}} = (-0.57263 * T_{iF} + 1094.273) * 2.3260 \quad (19)$$

$$h_{f_{gi}} = (-0.57263 * 131 + 1094.273) * 2.3260$$

$$h_{f_{gi}} = 2371 \frac{kJ}{kg}$$

Dónde:

$T_{iF}$  = Temperatura  $T_i$  en grados Fahrenheit (°F)

Integrando en el periodo de velocidad decreciente, esto es cuando la velocidad de secado cae lentamente con relación al contenido de humedad, se puede asumir que la velocidad de secado es proporcional al contenido de humedad, esto es:

$$R = aX \quad (20)$$

Remplazando la ecuación 11 en la ecuación 20 e integrando entre las Humedad crítica y final respetivamente se tiene:

$$t_T - t_c = \frac{m_{saji}}{A_{co} * a} \ln \left( \frac{X_{scr}}{X_{sf}} \right) \quad (21)$$

Dado que,  $a = \frac{R_c}{X_{scr}}$  y reemplazando la ecuación 12 en la 21, el tiempo mínimo de secado es:

$$t_T = \frac{m_{saji}}{A_{co} * R_c} \left[ X_{si} - X_{scr} + X_{scr} * \ln \left( \frac{X_{scr}}{X_{sf}} \right) \right] \quad (22)$$

Dónde:

$t_T$  = Tiempo mínimo de secado (s)

$X_{sf}$  = Porcentaje de humedad final en base húmeda (%)

Al no conocer el tiempo mínimo de secado ( $t_T$ ), resulta difícil conocer cuál es el valor del caudal másico de aire requerido para el proceso de secado y la velocidad de la masa de gas (G), debido a esto el valor del coeficiente de transferencia de calor ( $h_y$ ) debe ser obtenido mediante un proceso iterativo, para así llegar a un valor aproximado del tiempo total de secado (Ver Anexo C).

Del proceso iterativo se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 10.**  
**Resultados de las iteraciones del tiempo de secado**

| Variable   | Valor          |
|------------|----------------|
| $m_{aire}$ | 0.015          |
| G          | 0.021          |
| $h_y$      | 5.77           |
| $R_c$      | $4.872 E^{-6}$ |

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 22, el tiempo mínimo de secado es:

$$t_T = \frac{3.25}{7.89 * 4.872 E^{-6}} \left[ 0.87 - 0.64 + 0.64 * \ln \left( \frac{0.64}{0.1} \right) \right]$$

$$t_T \approx 33.3 \text{ h}$$

### 3.1.4 CALOR MÍNIMO REQUERIDO PARA EL SECADO DEL AJÍ

La energía mínima requerida para secar el producto se la determina de la siguiente forma:

$$Q_T = Q_{aji} + Q_{agua} + Q_r + Q_{ev} + Q_p \quad (23)$$

$$Q_p = q_p * t_T \quad (24)$$

Dónde:

$Q_T$  = Calor mínimo necesario para el secado (kJ)

$Q_{aji}$  = Calor necesario para calentar la masa de ají (kJ)

$Q_{agua}$  = Calor sensible del agua (kJ)

$Q_r$  = Calor remanente (kJ)

$Q_{ev}$  = Calor latente de vaporización (kJ)

$Q_p$  = Pérdidas de calor en la cámara de secado (kJ)

$q_p$  = Flujo de pérdidas de calor en la cámara de secado (W)

#### 3.1.4.1 CALOR NECESARIO PARA CALENTAR LA MASA DE AJÍ

Es el calor necesario para llevar de una temperatura ambiente  $T_a$ , hasta la temperatura superficial de la cama de ají  $T_i$ , esta energía se define mediante la siguiente relación:

$$Q_{aji} = m_{saji} * Cp_{aji} * (T_i - T_a) \quad (25)$$

Dónde:

$m_{saji}$  = Masa seca de ají (kg)

$Cp_{aji}$  = Calor específico del ají (J/kg °K)

$T_i$  = Temperatura de la superficie del ají (328 °K)

$T_a$  = Temperatura ambiente (°K)

(Machado & Vélez, 2008) realizaron el estudio experimental sobre las propiedades térmicas de los alimentos frescos y congelados, en donde determinaron que el calor específico del ají en base a su humedad es de (3.840 E3 J/kg °K).

$m_{sají}$  , se obtiene de:

$$m_{sají} = M_T * \left(1 - \frac{X_{si}}{100}\right) \quad (26)$$

$$m_{sají} = 25 * \left(1 - \frac{87}{100}\right)$$

$$m_{sají} = 3.25 \text{ kg}$$

Dónde:

$X_{si}$  = Porcentaje de humedad inicial en base húmeda del ají (87 %)

De la ecuación 25 se obtiene que:

$$Q_{aji} = m_{sají} * C_{p_{aji}} * (T_i - T_a)$$

$$Q_{aji} = 3.25 * 3840 * (328 - 293)$$

$$Q_{aji} = 436.800 \text{ kJ}$$

### 3.1.4.2 CALOR SENSIBLE DEL AGUA

Es la energía necesaria para calentar el agua del producto desde la temperatura ambiente hasta la del proceso:

$$Q_{agua} = \Delta M_w * C_{p_{wv}} * (T_i - T_a) \quad (27)$$

Dónde:

$Q_{agua}$  = Calor sensible del agua (kJ)

$\Delta M_w$  = Variación de la masa de agua del ají (kg)

$C_{p_{wv}}$  = Calor específico del vapor de agua (J/kg K)

### Variación de la masa de agua del ají ( $\Delta M_w$ )

Conociendo que la variación de la masa de agua del ají, es la diferencia entre la masa de agua del ají inicial y la masa de agua del ají final se tiene la siguiente ecuación:

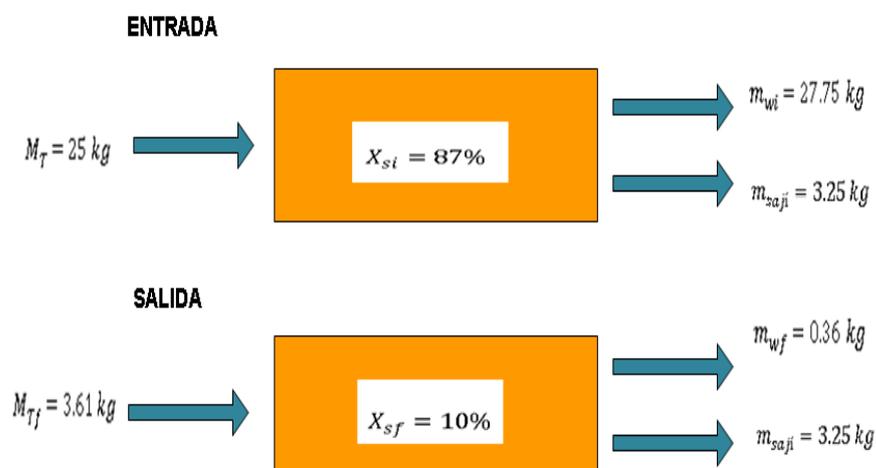
$$\Delta M_w = m_{wi} - m_{wf} \quad (28)$$

Dónde:

$m_{wi}$  = Masa de agua inicial del ají (kg)

$m_{wf}$  = Masa de agua final o remanente del ají (kg)

La masa total de cualquier producto está constituida por la masa de agua más la masa seca a la humedad respectiva como se puede observar en la siguiente figura 31.



**Figura 31. Variación de la masa del sólido**

La masa seca del ají permanece constante; en base a esto para la condición inicial y final del secado se tiene:

$$M_T = m_{wi} + m_{saji} \quad (29)$$

$$M_{Tf} = m_{wf} + m_{saji} \quad (30)$$

Dónde:

$M_{Tf}$  =Masa del producto a la humedad final (kg)

La masa seca en función de la humedad inicial y final se puede expresar como:

$$m_{sají} = M_T * \left(1 - \frac{X_{si}}{100}\right) \quad (31)$$

$$m_{sají} = M_{Tf} * \left(1 - \frac{X_{sf}}{100}\right) \quad (32)$$

Remplazando las ecuaciones 29 y 30 en la ecuación 28 se tiene:

$$\Delta M_w = M_T - M_{Tf} \quad (33)$$

Despejando las ecuaciones 31, 32 y remplazando en la ecuación 33 se tiene:

$$M_T = \frac{m_{sají}}{\left(1 - \frac{X_{si}}{100}\right)} \quad (34)$$

$$M_{Tf} = \frac{m_{sají}}{\left(1 - \frac{X_{sf}}{100}\right)} \quad (35)$$

$$\Delta M_w = m_{sají} * \left[ \frac{(X_{si} - X_{sf}) * 100}{(100 - X_{si}) * (100 - X_{sf})} \right] \quad (36)$$

Dónde:

$\Delta M_w$  = Variación de la masa de agua del ají (kg)

$X_{si}$  = Porcentaje de humedad inicial en base húmeda (%)

$X_{sf}$  = Porcentaje de humedad final en base húmeda (%)

Sustituyendo la ecuación 26 en la ecuación 36, se obtiene la ecuación que describe la variación de la masa de agua del ají:

$$\Delta M_w = M_T * \left[ \frac{\left(1 - \frac{X_{si}}{100}\right) * (X_{si} - X_{sf}) * 100}{(100 - X_{sin}) * (100 - X_{sf})} \right] \quad (37)$$

Con los datos del proceso la variación de la masa de agua del ají es:

$$\Delta M_w = 25 * \left[ \frac{\left(1 - \frac{87}{100}\right) * (87 - 10) * 100}{(100 - 87) * (100 - 10)} \right]$$

$$\Delta M_w = 21.39 \text{ kg}$$

### Calor específico del vapor de agua ( $C_{p_{wv}}$ )

(Ginnings & Furaka, 1953) determinaron una relación para determinar el calor específico a presión constante, la cual se puede calcular con la siguiente correlación:

Para el rango de temperatura entre 273 °K y 410 °K:

$$C_{p_{wv}} = (C_1 - C_2 * T_i + C_3 * T_i^2 - C_4 * T_i^3) * 4184 \quad (38)$$

$$C_{p_{wv}} = (C_1 - C_2 * 328 + C_3 * (328)^2 - C_4 * (328)^3) * 4184$$

$$C_{p_{wv}} = 1873 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$$

Dónde:

$$C_1 = 0.4522$$

$$C_2 = 1.2922 \text{ E}^{-4}$$

$$C_3 = 4.1701 \text{ E}^{-7}$$

$$C_4 = 2.0040 \text{ E}^{-10}$$

De la ecuación 27, se determina el calor sensible del agua, de la siguiente manera:

$$Q_{agua} = 21.39 * 1873 * (328 - 293)$$

$$Q_{agua} = 1402 \text{ kJ}$$

### 3.1.4.3 CALOR REMANENTE

Es la energía necesaria para calentar el agua remanente del producto al final del secado y se obtiene mediante:

$$Q_r = m_{wf} * C_{pw} * (T_i - T_a) \quad (39)$$

Dónde:

$Q_r$  = Calor remanente (kJ)

$C_{pw}$  = Calor específico del agua (J/kg °K)

### Masa de agua final o remanente del ají ( $m_{wf}$ )

Para determinar la masa de agua remanente se utiliza la siguiente expresión:

$$m_{wf} = M_{Tf} * \frac{X_{sf}}{100} \quad (40)$$

De la ecuación 33 se tiene que:

$$M_{Tf} = M_T - \Delta M_w \quad (41)$$

Remplazando la ecuación 41 en la ecuación 40, se obtiene:

$$m_{wf} = (M_T - \Delta M_w) * \frac{X_{sf}}{100} \quad (42)$$

Con los datos del proceso  $m_{wf}$  es:

$$m_{wf} = (25 - 21.39) * \frac{10}{100}$$

$$m_{wf} = 0.36 \text{ kg}$$

### Calor específico del agua ( $Cp_w$ )

El calor específico a presión constante en función de la temperatura se obtuvo de los datos experimentales obtenidos por Ginnings y Furakawa.

Para el rango de temperatura entre 273 °K y 410 °K:

$$Cp_w = (C_1 - C_2 * T_i + C_3 * T_i^2 - C_4 * T_i^3) * 4184 \quad (43)$$

$$Cp_w = (C_1 - C_2 * 328 + C_3 * (328)^2 - C_4 * (328)^3) * 4184$$

$$Cp_w = 4179 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}$$

Dónde:

$$C_1 = 2.1397$$

$$C_2 = 9.6814 \text{ E}^{-3}$$

$$C_3 = 2.6854 \text{ E}^{-5}$$

$$C_4 = 2.4214 \text{ E}^{-8}$$

El calor remanente es:

$$Q_r = 0.36 * 4179 * (328 - 293)$$

$$Q_r = 52.818 \text{ kJ}$$

#### 3.1.4.4 CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN

El calor latente de vaporización, es la energía necesaria para evaporar el agua del producto.

$$Q_{ev} = h_{f,gi} * \Delta M_w \quad (44)$$

Dónde:

$$Q_{ev} = \text{Calor latente de vaporización (KJ)}$$

$$h_{f,gi} = \text{Entalpia de vaporización (KJ/kg)}$$

### Entalpia de vaporización ( $h_{fgi}$ )

Para calcular la entalpia de vaporización, para una temperatura mayor a 68 °F y menor a 140 68 °F (Bracero & Cabezas, 1992), se tiene:

$$h_{fgi} = (-0.57263 * T_{iF} + 1094.273) * 2.3260 \quad (45)$$

$$h_{fgi} = (-0.57263 * 131 + 1094.273) * 2.3260$$

$$h_{fgi} = 2371 \frac{kJ}{kg}$$

Dónde:

$T_{iF}$  = Temperatura  $T_i$  en grados Fahrenheit (°F)

De la ecuación 44, se determina el calor latente de vaporización:

$$Q_{ev} = 2371 * 21,39$$

$$Q_{ev} = 50708.7 \text{ KJ}$$

#### 3.1.4.5 PÉRDIDAS DE CALOR DESDE LA CÁMARA DE SECADO

Para el análisis de las pérdidas de calor de la cámara de secado, se lo realizará mediante el método de resistencias térmicas en paredes planas tanto por conducción, convección y radiación.

Debido a que se desea que el flujo de calor de pérdidas sea el más bajo posible, se debe realizar una adecuada selección del material aislante que se va a utilizar, para lo cual se utiliza una matriz de puntos ponderados para la selección de la mejor alternativa para la elaboración de la matriz se lo realiza de la misma forma que se lo hizo para la selección del espesor del lecho de ají , tomando como criterio de selección los siguientes parámetros de discriminación:

- Conductividad térmica
- Facilidad de adquisición
- Facilidad de implementación

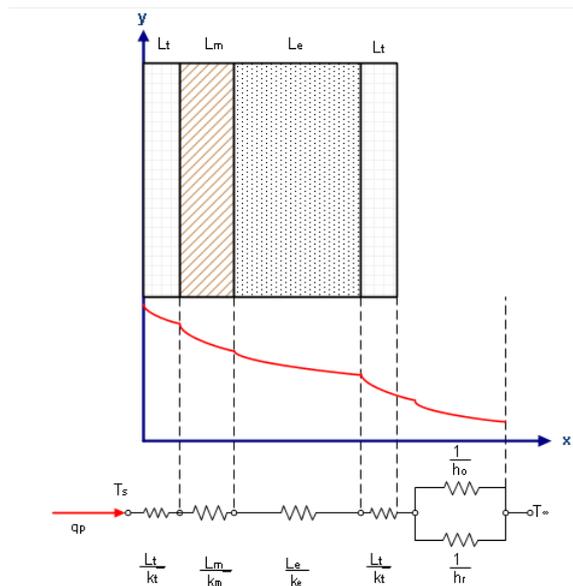
- Densidad del aislante
- Durabilidad
- Costos

A continuación se muestra la matriz de selección:

**Tabla 11.**  
**Matriz de selección para el aislante térmico**

|   |                             | Aislante térmico |      |          |      |          |      |          |             |         |
|---|-----------------------------|------------------|------|----------|------|----------|------|----------|-------------|---------|
|   |                             | EPS              |      |          | Aire |          | Paja |          | Lana Vidrio |         |
|   | Criterio de evaluación      | W.F.             | R.F  | Calif. 1 | R.F  | Calif. 2 | R.F  | Calif. 3 | R.F         | Calif 4 |
| 1 | Conductividad Térmica       | 0.23             | 9    | 2.05     | 10   | 2.27     | 6    | 1.36     | 9           | 2.05    |
| 2 | Densidad                    | 0.23             | 9    | 2.05     | 10   | 2.27     | 3    | 0.68     | 6           | 1.36    |
| 3 | Costos                      | 0.17             | 7    | 1.17     | 10   | 1.67     | 8    | 1.33     | 5           | 0.83    |
| 4 | Durabilidad                 | 0.15             | 4    | 0.61     | 10   | 1.52     | 1    | 0.15     | 7           | 1.06    |
| 5 | Facilidad de adquisición    | 0.14             | 9    | 1.23     | 10   | 1.36     | 3    | 0.41     | 6           | 0.82    |
| 6 | Facilidad de implementación | 0.09             | 9    | 0.82     | 1    | 0.09     | 5    | 0.45     | 9           | 0.82    |
|   |                             | 1.00             | 7.91 | 9.18     | 4.39 | 6.94     |      |          |             |         |

Como se puede apreciar en la tabla 11 el aire es el mejor aislante térmico que se puede utilizar, sin embargo el aire presenta algunos problemas operativos puesto que al estar en un espacio confinado y sujeto a temperaturas que pueden cambiar durante la operación del secador, puede producirse condensación en el interior y deteriorar a la cámara de secado, además para que la transferencia de calor se produzca únicamente por conducción el número de Nusselt debe ser menor que uno y el número de Rayleigh menor igual a mil, esta condición solo se podría obtener con un espacio inferior a un centímetro, esta separación presenta dificultades al momento de construirla y para separaciones más grandes se produce un fenómeno de conducción y convección aumentando así las pérdidas de calor. Debido a esto se selecciona al poliestireno expandido como aislante térmico que es el material con mejor puntaje después del aire, a continuación se determina el espesor que deberá tener.



**Figura 32. Gradiente de temperatura de la cámara de secado**

Se puede expresar las pérdidas de calor de la siguiente forma:

$$q_p = \left[ \frac{T_s - T_\infty}{\frac{L_t}{k_t} + \frac{L_m}{k_m} + \frac{L_e}{k_e} + \frac{L_t}{k_t} + \frac{1}{h_{cr}}} \right] * A_T \quad (46)$$

$$h_{cr} = h_o + h_r \quad (47)$$

Dónde:

$q_p$  = Flujo de pérdidas de calor en la cámara de secado (W)

$T_s$  = Temperatura superficial en la cámara de secado (°K)

$T_\infty$  = Temperatura ambiente (°K)

$L_t$  = Espesor de la chapa metálica(m)

$L_e$  = Espesor del aislante térmico (m)

$L_m$  = Espesor de la madera (m)

$k_m$  = Coeficiente de conducción de la madera (W/m°K)

$A_T$  = Área total de la cámara de secado (m<sup>2</sup>)

$h_o$  = Coeficiente de convección externa (W/m<sup>2</sup>°K)

$h_r$  = Coeficiente de radiación (W/m<sup>2</sup>°K)

$h_{cr}$  = Coeficiente de convección y radiación (W/m<sup>2</sup>°K)

$k_e$  = Coeficiente de conducción del poliestireno expandido (W/m°K)

$k_t$  = Coeficiente de conducción de la chapa metálica (W/m°K)

(Instituto Nacional de Meteorología e hidrología, 2012) realizó el estudio el conocimiento del tiempo y la situación climática en el Ecuador, en donde se recolectaron que para la zona en donde se encuentra el Cabuyal la temperatura ambiente es de aproximadamente de 293 °K.

Según (Incropera & Dewitt, 1999) los coeficiente de conducción de la madera y de la chapa metálica son de (0.094 W/m°K) y (63.9 W/m°K), respectivamente, y el (Instituto Valenciano de la Edificación, 2012) obtuvieron que el coeficiente de conducción para el poliestireno expandido es de (0,04 W/m°K).

### Área de transferencia de calor ( $A_T$ )

Tomando las dimensiones mostradas en la tabla 9, el área total de transferencia de calor es:

$$A_T = (2 * H_{cs} + 2 * B_{cs}) * D_{cs} + 2(H_{cs} * B_{cs}) \quad (48)$$

$$A_T = (2 * 1.10 + 2 * 0.6) * 1.2 + 2(1.10 * 0.6)$$

$$A_T = 5.4 \text{ m}^2$$

Dónde:

$H_{cs}$  = Altura de la cámara de secado (m)

$B_{cs}$  = Ancho de la cámara de secado (m)

$D_{cs}$  = Profundidad de la cámara de secado (m)

### **Coeficiente de convección externa ( $h_o$ )**

Watmuff formuló una ecuación para el cálculo del coeficiente de convección externo en función de la velocidad del viento (Duffie & Beckman, 1980), en este caso para la zona del Cabuyal es de 2.5 (m/s) (Stackhouse, 2015), dada por la siguiente expresión:

$$h_o = 2.8 + 3 * v_w \quad (49)$$

$$h_o = 10.3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

Dónde:

$v_w$  = Velocidad del viento (2.5 m/s)

### **Coeficiente de radiación ( $h_r$ )**

Debido a que la radiación se produce entre dos cuerpos, se analiza el flujo de radiación que se produce entre la temperatura superficial externa de la cámara de secado con la temperatura del ambiente. El coeficiente de radiación se lo obtiene con la siguiente ecuación (Incropera & Dewitt, 1999,p.10), en donde según (Incropera & Dewitt, 1999):

“La emisividad de la chapa metálica es de 0.24”,(p.852).

$$h_r = \varepsilon_t * \sigma * (T_{so} + T_\infty) * (T_{so}^2 + T_\infty^2) \quad (50)$$

Dónde:

$h_r$  = Coeficiente de radiación ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ )

$\varepsilon_t$  = Emisividad de la chapa metálica

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $5.68 E^{-8}$ ) ( $W/m^2 \cdot ^\circ K^4$ )

$T_{so}$  = Temperatura superficial exterior de la cámara de secado ( $^\circ K$ )

Es importante mencionar que al no conocer la temperatura a la cual se encuentra la superficie exterior de la cámara de secado se asume que la misma que se encuentra 5  $^\circ C$  más que la temperatura ambiente y con esto

se calcula el coeficiente de radiación, el mismo que servirá como un primer valor para el proceso iterativo. Reemplazando los datos en la ecuación 50, se tiene que el coeficiente de radiación es:

$$h_r = 0.87 * 5.67E^{-8} * (298 + 293) * (298^2 + 293^2)$$

$$h_r = 5.09 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

Para determinar el espesor de aislante ( $L_e$ ) más adecuado, se realiza un proceso de cálculo iterativo el mismo que se muestra en la tabla 12, considerándose como parámetro de selección las pérdidas de calor ( $q_p$ ) y la temperatura en el exterior de la cámara de secado la cual debe tender al valor de la temperatura ambiente.

**Tabla 12.**  
**Pérdidas de calor en función de  $L_e$**

| Ítem | $L_e$<br>(m) | $T_{so}$<br>(°K) | $h_r$<br>(W/m <sup>2</sup> K) | $q_p$<br>(W) | $q_p$<br>% |
|------|--------------|------------------|-------------------------------|--------------|------------|
| 1    | 0.03         | 296.30           | 1.62                          | 212.49       | 20.15      |
| 2    | 0.04         | 295.61           | 1.62                          | 167.85       | 15.92      |
| 3    | 0.05         | 295.16           | 1.62                          | 138.72       | 13.16      |
| 4    | 0.06         | 294.84           | 1.62                          | 118.20       | 11.21      |
| 5    | 0.07         | 294.60           | 1.62                          | 102.97       | 9.77       |
| 6    | 0.08         | 294.42           | 1.62                          | 91.22        | 8.65       |
| 7    | 0.09         | 294.27           | 1.62                          | 81.87        | 7.77       |
| 8    | 0.1          | 294.16           | 1.62                          | 74.26        | 7.04       |

Se considera que las pérdidas de calor que se encuentren entre el 8 al 13% de la pérdida de calor si la cámara de secado no estuviese con aislante alguno, esto es:

$$q_{pse} = \left[ \frac{330 - 293}{\frac{0.001}{63.9} + \frac{0.01}{0.094} + \frac{0.001}{63.9} + \frac{1}{10.3 + 5.09}} \right] * 5.4$$

$$q_{pse} = 1054.32 \text{ W}$$

Dónde:

$q_{pse}$  = Flujo de pérdidas de calor en la cámara de secado sin aislante (W)

Para un espesor de aislante de 0.06 m las pérdidas de calor en la cámara de secado son aproximadamente del 11% con relación a  $q_{pse}$ , por lo que se escoge este espesor, con lo cual el flujo de pérdidas de calor es:

$$q_p = \left[ \frac{330 - 293}{\frac{0.001}{63.9} + \frac{0.01}{0.094} + \frac{0.06}{0.04} + \frac{0.001}{63.9} + \frac{1}{10.3 + 1.62}} \right] * 5.4$$

$$q_p = 118.2 \text{ W}$$

El calor mínimo necesario para el proceso de secado de ají, se la determina con la ecuación 23, esto es:

$$Q_T = 436.8E^3 + 1402E^3 + 52.818E^3 + 50708.7E^3 + 118.2 * 120240$$

$$Q_T = 66812686 \text{ J}$$

Donde el flujo de calor para el proceso de secado se lo puede determinar de la siguiente forma:

$$q_T = \frac{Q_T}{t_T}$$

$$q_T = \frac{66812686}{120240}$$

$$q_T = 556 \text{ W}$$

Dónde:

$q_T$  = Flujo de calor mínimo necesario para el secado (kJ)

Cabe mencionar que el flujo de calor total determinado no necesariamente es con el cual se va a utilizar para diseño del secador, ya que con este valor puede generarnos un colector con exageradas dimensiones, por esta razón se debe buscar un equilibrio tanto dimensional,

como energético, debido a esto se toma este valor para realizar una primera iteración para que en posteriores cálculos se obtengan los resultados deseados.

## **3.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL COLECTOR SOLAR**

### **3.2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR**

El dimensionamiento del colector solar, se lo realiza considerando los siguientes parámetros y condiciones de funcionamiento:

- Se consideran las mismas condiciones de funcionamiento que se emplearon para el diseño de la cámara de secado.
- Se considera un modelo matemático estacionario para describir el comportamiento del colector.
- La radiación incidente serán tomados de los datos promedios de la zona.
- La temperatura a la entrada del colector ( $T_a$ ), es igual al ambiente en el Cabuyal (20°C)
- La temperatura de salida del colector ( $T_u$ ), es igual a 57°C.
- La temperatura media en el interior del colector es igual al promedio entre la temperatura de entrada y salida.
- La temperatura superficial de la cubierta exterior del colector es igual al promedio entre la temperatura media dentro del colector y la temperatura ambiente.
- La humedad relativa a la salida del secador es de 90%, evitando así que el aire se condense al chocar con las paredes, evitando así que el aire al pasar por la cámara de secado se condense.
- El flujo de humedad absorbido por el aire será siempre el mismo.

### **3.2.2 CAUDAL MÁSSICO DE AIRE**

El caudal mínimo requerido para que transporte el agua evaporada del proceso de secado se halla aplicando la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{m_{aire}}{t_T} \quad (51)$$

Dónde:

$\dot{m}_{aire}$  = Caudal másico mínimo de aire (kg/s)

$m_{aire}$  = Masa total de aire (kg)

### **Masa total de aire ( $m_{aire}$ )**

La masa de aire está compuesta por una masa seca y una masa humedad a su respectiva humedad, se la pueda expresar como:

$$m_{aire} = m_{saire} + m_{waire} \quad (52)$$

$$m_{aire} = m_{saire} + m_{saire} * W_a \quad (53)$$

Dónde:

$m_{saire}$  = Masa seca del aire(kg)

$m_{waire}$  = Masa de agua del aire (kg)

$W_a$  = Humedad absoluta del ambiente (%)

### **Masa seca del aire ( $m_{saire}$ )**

La masa seca del aire es la relación entre la variación del agua vs la variación de humedad absoluta del aire, esto es:

$$m_{saire} = \frac{\Delta M_w}{\Delta w} \quad (54)$$

Dónde:

$\Delta M_w$  = Variación de la masa de agua del ají (kg)

$\Delta w$  = Variación de la humedad absoluta del aire durante el secado (kg<sub>agua</sub> / kg<sub>aire seco</sub>)

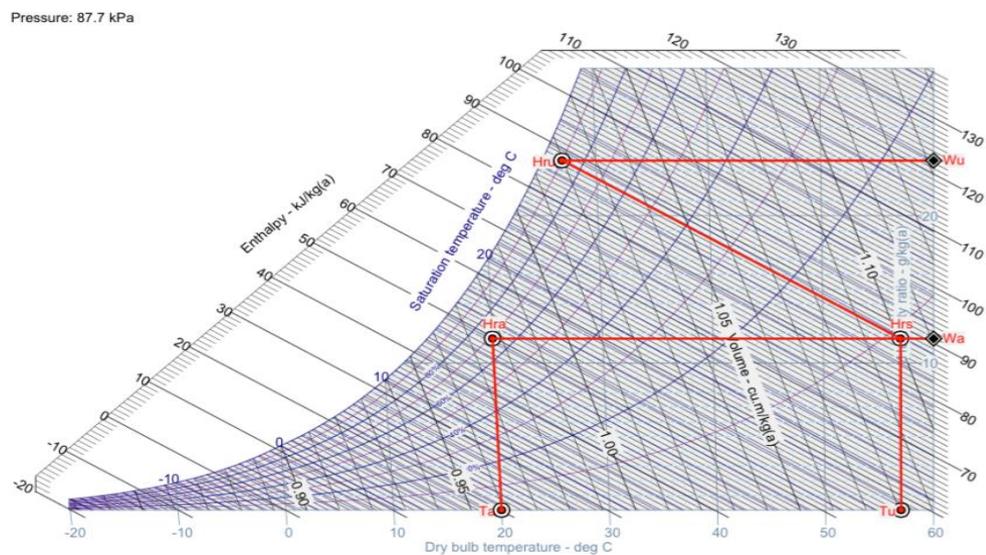
La variación de la humedad absoluta del aire se la puede determinar con la ayuda de las carta psicométrica a la presión atmosférica de la zona, para

ello se debe partir de los parámetros técnicos y ambientales en el sector del Cabuyal lugar en donde va operar el secador.

**Tabla 13.**

**Parámetros psicrométricos**

| Parámetro  | Símbolo     | Cantidad | Unidad |
|--|-------------|----------|--------|
| Altura   | H           | 1469     | msnm   |
| Presión atmosférica                                      | $P_{a1469}$ | 87.7     | KPa    |
| Temperatura de bulbo seco                                | $T_a$       | 20       | °C     |
| Temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado | $T_u$       | 57       | °C     |
| Humedad relativa del ambiente                            | $H_{ra}$    | 68.7     | %      |
| Humedad de saturación                                    | $H_{ru}$    | 90       | %      |



**Figura 33. Proceso psicrométrico del aire**

Los parámetros de la tabla 13 son representados gráficamente en la figura 33, donde se muestra:

- Proceso de calentamiento sensible del aire desde la temperatura  $T_a$  hasta  $T_u$ .

- Proceso de secado y saturación del aire a entalpía constante (proceso adiabático), desde Hrs a Hru.

Es importante mencionar que la humedad absoluta del ambiente ( $W_a$ ) permanece constante tanto a la entrada y salida del colector. En la tabla 14 se indican los resultados del proceso psicométrico del aire.

**Tabla 14.**  
**Resultados del proceso psicométrico del aire**

| Parámetro   | Símbolo | Cantidad | Unidad  |
|---|---------|----------|---|
| Humedad absoluta del ambiente                           | $W_a$   | 11.6510  | $\frac{g_{\text{agua}}}{kg_{\text{aire seco}}}$ |
| Humedad absoluta a la salida de la cámara de secado     | $W_u$   | 23.7447  | $\frac{g_{\text{agua}}}{kg_{\text{aire seco}}}$ |
| Humedad relativa del aire a la salida del colector      | Hrs     | 9.3      | %   |
| Temperatura del aire a la salida de la cámara de secado | $T_2$   | 27       | °C  |

Con los datos de la tabla anterior, se tiene que la variación de la humedad absoluta del aire durante el proceso de secado es:

$$\Delta W = (W_u - W_a) * 1 E^{-3} \quad (55)$$

$$\Delta W = 0.012 \frac{Kg_{\text{agua}}}{kg_{\text{aire seco}}}$$

La masa seca del aire es:

$$m_{\text{saire}} = \frac{21.39}{0.012}$$

$$m_{\text{saire}} = 1782.5 \text{ kg}_{\text{aire seco}}$$

Una vez determinada la masa seca del aire, la masa total del aire ( $m_{\text{aire}}$ ) es igual a:

$$m_{aire} = 1782.5 + (1782.5 * 11.6510) * 1 E^{-3}$$

$$m_{aire} = 1803.26 \text{ kg}$$

De la ecuación 51 se obtiene el valor del caudal másico del aire:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{1803.26}{120400.36}$$

$$\dot{m}_{aire} = 0.015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 3.2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR

Para obtener el comportamiento térmico del sistema colector-almacenador se realiza un modelo matemático con las siguientes consideraciones:

- El Flujo de calor es unidimensional, perpendicular al colector.
- Se desprecia las pérdidas de calor en las paredes laterales del colector.
- Se desprecia la resistencia por conducción de la cubierta.
- La energía solar incidente absorbida por la cubierta es despreciable.
- Las propiedades termofísicas de los elementos permanecen constantes durante todo el proceso.
- El lecho de rocas es el que absorbe la energía solar incidente.
- El análisis del calentamiento del aire se lo realiza en estado estable y el calentamiento dentro del lecho de rocas se lo realiza en estado transitorio.
- Las pérdidas de calor se consideran desde el lecho de rocas hacia el ambiente y hacia la parte inferior.
- Se considera que la temperatura en cualquier punto en el lecho de rocas es uniforme para cualquier instante de tiempo.

Para el desarrollo del modelo matemático se escogió, como volumen de control el lecho de rocas (elemento captador-almacenador de energía) y el

aire (medio que gana y transporta calor), los cuales están relacionados entre sí y permiten describir este fenómeno. Aplicando la primera ley de la termodinámica se tiene:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sal} + \dot{E}_{alm} \quad (56)$$

Dónde:

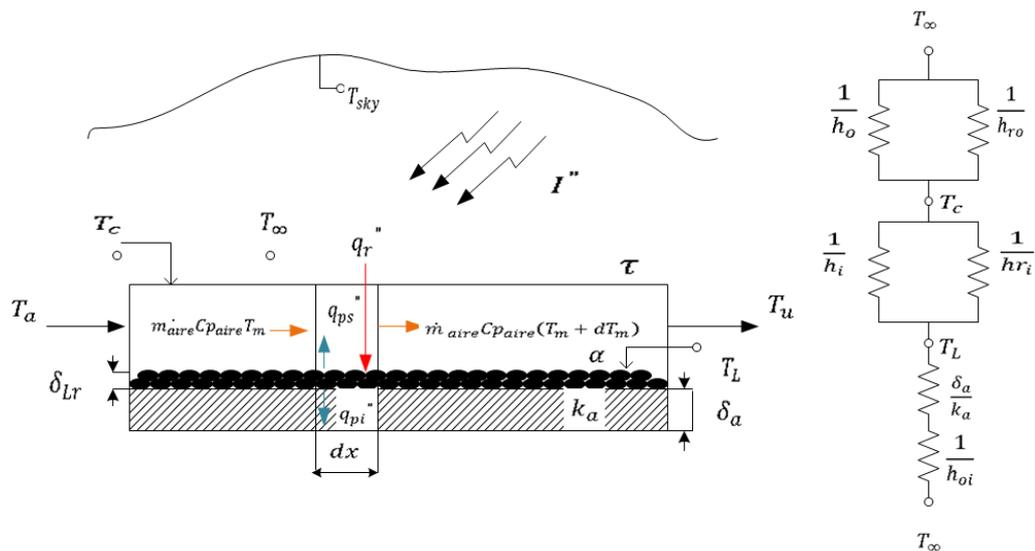
$\dot{E}_{ent}$  = Energía que entra al sistema (W)

$\dot{E}_g$  = Energía generada por una fuente química, etc. (W)

$\dot{E}_{sal}$  = Energía que sale del sistema (W)

$\dot{E}_{alm}$  = Energía almacenada en el sistema (W)

### 3.2.3.1 MODELO MATEMÁTICO PARA EL AIRE



**Figura 34. Balance de energía para un elemento diferencial del aire en el colector-almacenador y diagrama de resistencias térmicas.**

La figura 34 es una representación del modelo físico de la transferencia de calor para el colector-almacenador, en el que se indican las energías que intervienen en el proceso de calentamiento del aire por convección natural al atravesar por este.

Al no existir generación de energía interna, ni almacenamiento de energía, la ecuación 56 se expresa como:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal} \quad (57)$$

La energía que gana el aire es igual a la radiación solar incidente sobre la superficie del lecho de rocas, menos las pérdidas de calor desde esta superficie hacia la parte superior e inferior del colector solar, aplicando la ecuación 57 al elemento diferencial en análisis se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{(I'' \tau \alpha - (U_{sLa} + U_{iLa})(T_L - T_\infty)) w}{\dot{m}_{aire} C_{p_{aire}}} \quad (58)$$

Dónde:

- $I''$  = Energía incidente en el lecho de rocas ( $W/m^2$ )
- $\tau$  = Trasmisividad de la cubierta transparente
- $\alpha$  = Absortancia del lecho de rocas
- $w$  = Ancho del colector (m)
- $U_{sLa}$  = Coeficiente global de transferencia de calor superior entre el lecho de rocas y el ambiente ( $W/m^2 \cdot K$ )
- $U_{iLa}$  = Coeficiente global de transferencia de calor inferior entre el lecho de rocas y el ambiente ( $W/m^2 \cdot K$ )
- $T_\infty$  = Temperatura ambiente ( $^\circ K$ )
- $T_L$  = Temperatura superficial en el lecho de rocas ( $^\circ K$ )
- $\dot{m}_{aire}$  = Flujo másico de aire (kg/s)
- $C_{p_{aire}}$  = Calor específico del aire ( $J/kg \cdot ^\circ K$ )
- $\frac{dT_m}{dx}$  = Variación de temperatura media del aire con respecto a longitud del colector ( $^\circ K/m$ )

Según (Incropera & Dewitt, 1999,p.852-853):

“La trasmisividad de la cubierta transparente es de 0.88 y la absortancia de las rocas es de 0.98”

Resolviendo la ecuación diferencial 58 se tiene:



calor desde el lecho hacia el ambiente por conducción, convección y radiación. De donde la ecuación en estado transitorio que describe este proceso es:

$$q_r'' = h_i(T_L - T_m) + (U_{sLa} + U_{iLa})(T_L - T_\infty) + \rho_{Lr}\delta_{Lr}Cp_{Lr} \frac{dT_L}{dt} \quad (61)$$

$$q_r'' = I'' * \tau * \alpha$$

Dónde:

$q_r''$  = Flujo de radiación solar absorbida (W/m<sup>2</sup>)

$\rho_{Lr}$  = Densidad del lecho de rocas (kg/m<sup>3</sup>)

$\delta_{Lr}$  = Espesor del lecho de rocas (m)

$Cp_{Lr}$  = Calor específico del lecho de rocas (J/kg°K)

$h_i$  = Coeficiente de convección en el interior del colector (W/m<sup>2</sup> °K)

$\frac{dT_L}{dt}$  = Variación de temperatura del lecho con respecto al tiempo (°K/s)

Aplicando la ecuación 61 al elemento diferencial en análisis, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{I''\tau\alpha + h_iT_m + (U_{sLa} + U_{iLa})T_\infty}{\rho_{Lr}\delta_{Lr}Cp_{Lr}} - \frac{(h_i + (U_{sLa} + U_{iLa}))}{\rho_{Lr}\delta_{Lr}Cp_{Lr}} T_L \quad (62)$$

La resolución de la ecuación diferencial 62 es:

$$T_L = T_a e^{-Jt_{TL}} + \frac{M}{J} (1 - e^{-Jt_{TL}}) \quad (63)$$

Dónde:

$t_{TL}$  = Tiempo requerido para llegar a la temperatura  $T_L$  (s)

$$M = \frac{I''\tau\sigma + h_iT_m + (U_{sLa} + U_{iLa})T_\infty}{\rho_{Lr}\delta_{Lr}Cp_{Lr}}$$

$$J = \frac{h_i + (U_{sLa} + U_{iLa})}{\rho_{Lr} \delta_{Lr} C p_{Lr}}$$

Analizando en el estado estable el lecho de rocas es decir cuando  $(dT_L/dt=0)$ , de la ecuación 61 se obtiene que:

$$q_r'' = h_i(T_L - T_m) + (U_{sLa} + U_{iLa})(T_L - T_\infty) \quad (64)$$

### 3.2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR-ALMACENADOR

Para determinar las dimensiones adecuadas del colector se debe determinar las variables que involucran en el modelo matemático, mediante un proceso iterativo, a continuación se indica los criterios y ecuaciones utilizadas para el diseño del colector.

#### 3.2.4.1 LONGITUD DEL COLECTOR

La dimensión de la longitud del colector se establece en la ecuación 59, esto es:

$$L = \frac{\dot{m}_{aire} C p_{aire} (T_m - T_a)}{w[I'' \tau \alpha - (U_{sLa} + U_{iLa})(T_L - T_\infty)]} \quad (65)$$

#### Temperatura superficial del lecho de rocas ( $T_L$ )

De la ecuación 64 se obtiene la temperatura en el lecho de rocas:

$$T_L = \frac{q_r'' + (h_i T_m + (U_{sLa} + U_{iLa}) T_\infty)}{h_i + (U_{sLa} + U_{iLa})} \quad (66)$$

#### Temperatura media del aire en el interior del colector ( $T_m$ )

La temperatura media del aire ( $T_m$ ), es el promedio entre la temperatura de ingreso y la de salida esto es:

$$T_m = \frac{T_u + T_a}{2} \quad (67)$$

$$T_m = \frac{293 + 330}{2}$$

$$T_m = 311.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Es importante mencionar que todas las propiedades termofísicas para el aire en el interior del colector se las determina a esta temperatura.

### Calor específico del aire a presión constante ( $C_{p_{aire}}$ )

La capacidad calórica a presión constante del aire se la puede obtener a partir de los datos obtenidos por Dommett (Touloukian & Makita, 1976,p.169), cuya ecuación de correlación, para temperaturas entre 250 y 600 °K, es la siguiente:

$$C_{p_{aire}} = (C_5 - C_6 * T_m + C_7 * T_m^2 - C_8 * T_m^3) * 4184 \quad (68)$$

$$C_{p_{aire}} = 1.005E^3 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ\text{K}}$$

Dónde:

$$C_5 = 0.2443$$

$$C_6 = 4.2042 \text{ E}^{-5}$$

$$C_7 = 9.6113 \text{ E}^{-8}$$

$$C_8 = 1.1638 \text{ E}^{-11}$$

### Radiación solar ( $I''$ )

Para obtener la radiación solar incidentente, se utiliza la radiación promedio en cada hora ( $I_T$ ) del Cabuyal, las horas de helifonia consideradas para el diseño son de 4 horas.

$$I'' = \frac{I_T''}{h_{he}} \quad (69)$$

$$I'' = \frac{3690}{4}$$

$$I'' = 922.5 \frac{W}{m^2}$$

Dónde:

$I_T''$  = Radiación solar (3690 Wh/m<sup>2</sup>día)

$h_{he}$  = Horas de helifonia (h)

### Flujo de Aire necesario ( $\dot{m}_{aire}$ )

Para optimizar el diseño del colector es importante conocer cuál es caudal másico requerido para proporcionar el flujo de calor necesario para el proceso de secado, esto es:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{qT}{(T_u - T_a) * Cp_{aire}} \quad (70)$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{556}{(330 - 293) * 1.005E^3}$$

$$\dot{m}_{aire} = 0.015 \frac{kg}{s}$$

### 3.2.4.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para determinar el coeficiente global de transferencia de calor tanto por la parte superior e inferior se lo realiza con el método de resistencias térmicas como se muestra en la figura 36.

$$U_T = U_{sLa} + U_{iLa} \quad (71)$$

Dónde:

$U_T$  = Coeficiente global de transferencia de calor superior e inferior (W/m<sup>2</sup>°K)

### Coeficiente global de transferencia de calor en la parte superior del lecho de rocas ( $U_{sla}$ )

El coeficiente global de transferencia de calor en la parte superior entre el lecho de rocas hacia el cielo donde su respectivo coeficiente es:

$$U_{sLa} = \frac{(h_o + h_{ro})(h_i + h_{ri})}{(h_o + h_{ro} + h_i + h_{ri})} \quad (72)$$

Dónde:

$h_o$  = Coeficiente de convección externa (W/m<sup>2</sup> °K)

$h_{ro}$  = Coeficiente de radiación entre la cubierta transparente y el cielo (W/m<sup>2</sup> °K)

$h_{ri}$  = Coeficiente de radiación entre el lecho de rocas y la cubierta (W/m<sup>2</sup> °K)

### Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire ( $h_o$ )

Se lo calcula de igual manera como en el diseño de la cámara de secado utilizando la ecuación 49.

$$h_o = 10.3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \quad (73)$$

### Temperatura de la cubierta ( $T_c$ )

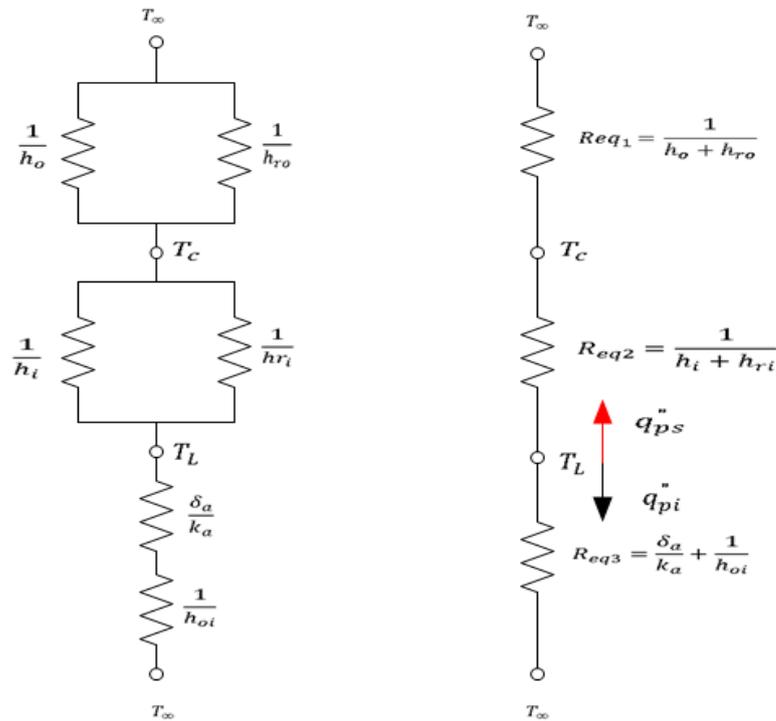
Para tener un valor inicial de temperatura en la cubierta, se supone que esta, es el promedio entre la temperatura media del aire y la temperatura ambiente, como se muestra a continuación:

$$T_c = \frac{T_m + T_\infty}{2} \quad (74)$$

$$T_c = \frac{311.5 + 293}{2}$$

$$T_c = 302.25 \text{ } ^\circ K$$

La ecuación que permite determinar la temperatura en la cubierta, se obtiene partiendo del diagrama de resistencia térmica equivalente mostrado en la figura 36, mediante un proceso iterativo.



**Figura 36. Circuito térmico equivalente para el colector-almacenador**

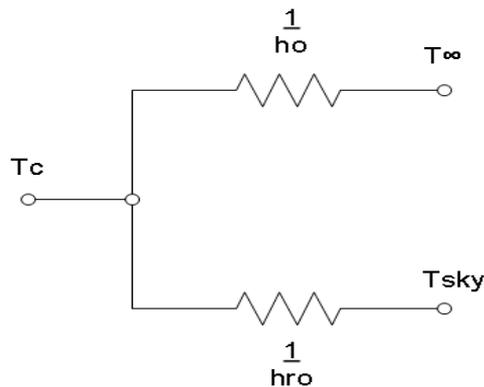
Como el flujo de pérdidas de calor por la parte superior, que se encuentra al pasar del lecho a la cubierta, es el mismo que existe de la cubierta al ambiente, por lo cual se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{T_L - T_c}{R_{eq2}} = \frac{T_c - T_\infty}{R_{eq3}} \quad (75)$$

$$T_c = \frac{T_L(h_{ri} + h_i) + T_a(h_{ro} + h_o)}{h_i + h_o + h_{ri} + h_{ro}} \quad (76)$$

### **Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta transparente y el cielo ( $h_{ro}$ )**

Debido a que la radiación se produce entre dos cuerpos, se analiza el flujo de radiación que se produce entre la temperatura de la cubierta del colector con la temperatura del ambiente y del cielo, como se muestra en la figura 37.



**Figura 37. Circuito de resistencias térmicas de convección y radiación**

Esto se lo puede expresar como:

$$q_{ra}'' = \varepsilon * \sigma (T_{so}^4 - T_{sky}^4) \quad (77)$$

$$q_{ra}'' = h_{ro} (T_{so} - T_{\infty}) \quad (78)$$

Dónde:

$q_{ra}''$  = Flujo de calor por radiación (W/m<sup>2</sup>)

Con el objetivo de cerrar el circuito se igualan las ecuaciones 75 y 76, donde se obtiene que el coeficiente de radiación (Incropera & Dewitt, 1999,p.9) es:

$$h_{ro} = \frac{\varepsilon_c * \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4)}{(T_c - T_{\infty})} \quad (79)$$

Dónde:

$\varepsilon_c$  = Emisividad de la cubierta (0.9)

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman (5.68 E-8 W/m<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>)

$T_c$  = Temperatura de la cubierta (°K)

**Temperatura del cielo ( $T_{sky}$ )**

Con la ecuación descrita por Swinbank y Quart (Staicovici, 2014,p.157), la temperatura del cielo en función de la temperatura ambiente es:

$$T_{sky} = 0.0552 * T_{\infty}^{1.5} \quad (80)$$

$$T_{sky} = 277 \text{ } ^\circ K$$

Dónde:

$T_{sky}$  = Temperatura del cielo ( $^\circ K$ )

### **Coefficiente de convección en el interior del colector ( $h_i$ )**

Para calcular el coeficiente de convección en el interior del colector se utiliza el Número de Nusselt del diámetro hidráulico:

$$h_i = \frac{N_{uD_h} k_{aire}}{D_h} \quad (81)$$

Dónde:

$N_{uD_h}$  = Número de Nusselt

$k_{aire}$  = Coeficiente de conducción del aire ( $W/m^\circ K$ )

$D_h$  = Diámetro hidráulico

Para temperaturas entre 270 y 840  $^\circ K$ , se puede calcular el coeficiente de conducción del aire, utilizando la ecuación propuesta por (Vines, 1960):

$$k_{aire} = (0.03743 + 7.9889E^{-4} * Tm - 1.6889E^{-7} * Tm^2) * 0.1 \quad (82)$$

$$k_{aire} = 0.027 \frac{W}{m^\circ K}$$

Dónde:

$k_{aire}$  = Coeficiente de conducción del aire ( $W/m^\circ K$ )

### **Diámetro Hidráulico ( $D_h$ )**

El diámetro hidráulico para ductos rectangulares se determina con la siguiente ecuación (Cengel & Ghajar, 2011,p.468), se supone para la primera iteración que el ancho del colector es igual a ancho de la cámara de

secado, además la altura del colector recomendada es de 0.04 m (Herrera & Montenegro, 2014) :

$$D_h = \frac{2aw}{a + w} \quad (83)$$

$$D_h = \frac{2(0.04 * 0.6)}{0.04 + 0.6}$$

$$D_h = 0.075 \text{ m}$$

Dónde:

$a$  = Altura del colector (m)

$w$  = Ancho del colector (m)

### Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura media dentro del colector ( $\mu_{T_m}$ )

Para el cálculo de la viscosidad dinámica se la obtiene en base a la ecuación determinada por Sutherland. Esta es:

$$\mu_{T_m} = \frac{\left(1.4676E^{-6} * (T_m)^{\frac{3}{2}}\right)}{107.87 + T_m} \quad (84)$$

$$\mu_{T_m} = \frac{\left(1.4676E^{-6} * (311.5)^{\frac{3}{2}}\right)}{107.87 + 311.5}$$

$$\mu_{T_m} = 1.924E^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}$$

Dónde:

$\mu_{T_m}$  = Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura  $T_m$  en el colector (N s/m<sup>2</sup>)

### Número de Reynolds para una sección rectangular dentro del colector ( $Re_c$ )

El régimen en el que se encuentra el fluido depende del número de Reynolds el cual determina si es un flujo laminar o turbulento:

$$Re_{cl} = \frac{v_c * \rho_{aTm} * D_h}{\mu_{Tm}} \quad (85)$$

$$\dot{m}_{aire} = v_c * \rho_{aTm} * A_{scl} \quad (86)$$

$$A_{scl} = w * a \quad (87)$$

Dónde:

$Re_{cl}$  = Número de Reynolds en el colector

$v_c$  = Velocidad en el colector (m/s)

$\rho_{aTm}$  = Densidad del aire a la temperatura  $T_m$  (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_{Tm}$  = Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura media dentro del colector (kg/m s)

$A_{scl}$  = Área de la sección transversal del colector (m<sup>2</sup>)

Remplazando 86 en 85 se obtiene que:

$$Re_{cl} = \frac{\dot{m}_{aire} * D_h}{A_{scl} * \mu_{Tm}} \quad (88)$$

$$Re_{cl} = \frac{\dot{m}_{aire} * D_h}{w * a * \mu_{Tm}} \quad (89)$$

Remplazando en la ecuación 83 en la ecuación 88 se obtiene la siguiente la ecuación del número de Reynolds en el interior del colector:

$$Re_{cl} = \frac{2 * \dot{m}_{aire}}{\mu_{Tm} * (a + w)}$$

$$Re_{cl} = \frac{2 * 0.015}{1.924E^{-5} * (0.04 + 0.6)}$$

$$Re_{cl} = 2399$$

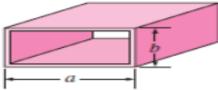
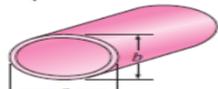
Como el número de Reynolds es mayor a 2300, pero inferior a 10000 por lo tanto se considera que el flujo es laminar, con este valor se determina el valor de numero de nusselt.

### Número de Nusselt ( $N_u$ )

El número de Nusselt puede ser determinado utilizando las correlaciones de convección para tubos no circulares para flujo laminar completamente desarrollado, para lo cual se debe conocer el valor del ancho y la altura del colector, puesto que estos valores son una incognita, se asume que el ancho del colector es igual al ancho de la cámara de secado, además la altura del colector esta entre 0.03 a 0.1 m (González, Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solare combinadas, 2012), del cual se toma como valor 0.04 m para una primera iteración. Una vez conocidos los valores de ancho y alto del colector se realiza la siguiente relación:

$$\frac{w}{a} = \frac{0.6}{0.04} = 15$$

Considerando una temperatura de la superficie uniforme, el número de Nusselt se obtiene de la figura 38:

| Configuración geométrica del tubo   | $a/b$ o $\theta^\circ$                          | Número de Nusselt                                    |  | Factor de fricción $f$   |
|---|---|--|--|--|
|   |   | $T_s = \text{Const.}$                                | $\dot{q}_s = \text{Const.}$                          |  |
| Círculo<br>    | —   | 3.66   | 4.36   | 64.00/Re   |
| Rectángulo<br> | $a/b$<br>1<br>2<br>3<br>4<br>6<br>8<br>$\infty$ | 2.98<br>3.39<br>3.96<br>4.44<br>5.14<br>5.60<br>7.54 | 3.61<br>4.12<br>4.79<br>5.33<br>6.05<br>6.49<br>8.24 | 56.92/Re<br>62.20/Re<br>68.36/Re<br>72.92/Re<br>78.80/Re<br>82.32/Re<br>96.00/Re |
| Elipse<br>     | $a/b$<br>1<br>2<br>4<br>8<br>16                 | 3.66<br>3.74<br>3.79<br>3.72<br>3.65                 | 4.36<br>4.56<br>4.88<br>5.09<br>5.18                 | 64.00/Re<br>67.28/Re<br>72.96/Re<br>76.60/Re<br>78.16/Re                         |
| Triángulo<br>  | $\theta$<br>10°<br>30°<br>60°<br>90°<br>120°    | 1.61<br>2.26<br>2.47<br>2.34<br>2.00                 | 2.45<br>2.91<br>3.11<br>2.98<br>2.68                 | 50.80/Re<br>52.28/Re<br>53.32/Re<br>52.60/Re<br>50.96/Re                         |

**Figura 38. Número de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en tubos de diferente sección transversal**

FUENTE: (Cengel & Ghajar, 2011)

Nusselt es igual a:

$$N_u = 7.54$$

Remplazando los valores anteriormente calculados, el coeficiente de conveccion en el interior del colector es:

$$h_i = \frac{7.54 * 0.027}{0.075}$$

$$h_i = 2.71 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

### **Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el lecho de rocas y la cubierta ( $h_{ri}$ )**

El coeficiente de radiación para dos planos paralelos está dado por la siguiente expresión (Duffie & Beckman, 1980, p.56):

$$h_{ri} = \frac{\sigma(T_L^2 + T_c^2)(T_L + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_{Lr}} - 1} \quad (90)$$

Dónde:

$\varepsilon_{Lr}$  = Emisividad del lecho de rocas

Según (Incropera & Dewitt, 1999):

“La emisividad del lecho de rocas es de 0.98”

Es importante mencionar que el valor del coeficiente de radiación entre el lecho y la cubierta se lo determina mediante un proceso iterativo, ya que está en función de la temperatura del lecho y de la cubierta.

### **Coefficiente global de transferencia de calor en la parte inferior del lecho de rocas ( $U_{ila}$ )**

El coeficiente global de transferencia de calor entre la parte inferior del lecho hacia el ambiente es calculado con la siguiente ecuación:

$$U_{iLa} = \frac{k_e h_{oi}}{\delta_p h_{oi} + k_e} \quad (91)$$

Dónde:

$K_e$  = Coeficiente de conducción del poliestireno expandido (0,04 W/m°K)

$h_{oi}$  = Coeficiente de convección de calor del aire entre la cubierta y el ambiente en la parte inferior (W/m<sup>2</sup>)

$\delta_p$  = Espesor del poliestireno en el colector, (m)

Tomando las recomendaciones de la NEC-10 el espesor del aislante en los colectores, no debe ser menor a 30 mm y superior a 50 mm, por lo que se selecciona un espesor de 100 mm que asegurará que las pérdidas hacia la parte inferior sean mínimas (Comité Ejecutivo del código Ecuatoriano de la construcción, 1996).

### **Coeficiente de convección de calor del aire entre la cubierta y el ambiente en la parte inferior ( $h_{oi}$ )**

El valor del coeficiente de convección en la parte inferior se lo calcula con la misma expresión que se lo realizó para la cámara de secado:

$$h_{oi} = 10.3 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

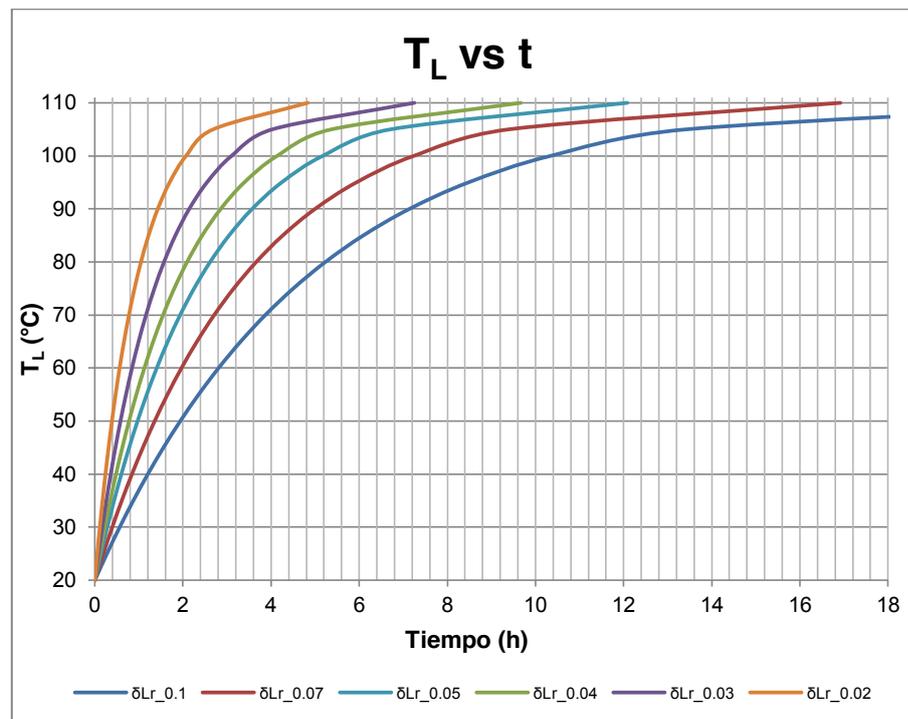
El coeficiente de transferencia de calor en la parte inferior del lecho es:

$$U_{iLa} = \frac{0.04 * 10.3}{0.1 * 10.3 + 0.04}$$

$$U_{iLa} = 0.4 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

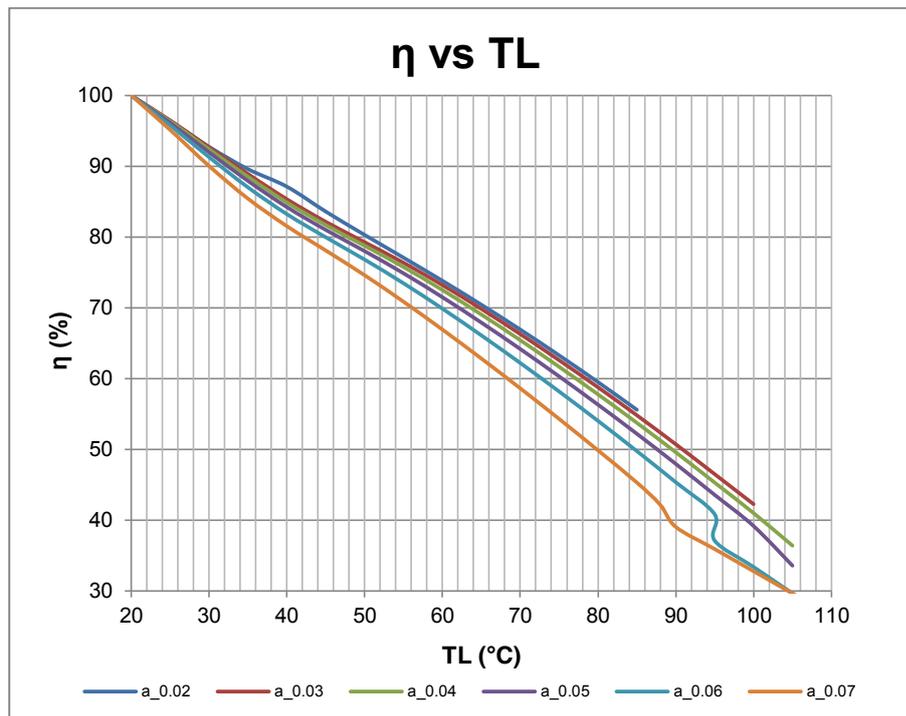
Puesto que el coeficiente global de transferencia de calor es muy pequeño en relación al coeficiente global de transferencia de calor en la parte superior, por lo que se puede despreciar las pérdidas de calor producidas desde la parte inferior del lecho hacia el ambiente.

A partir del modelo matemático se puede predecir el comportamiento térmico del colector-almacenador en diferentes configuraciones de parámetros geométricos y físicos, lo cual se indica en las siguientes curvas:



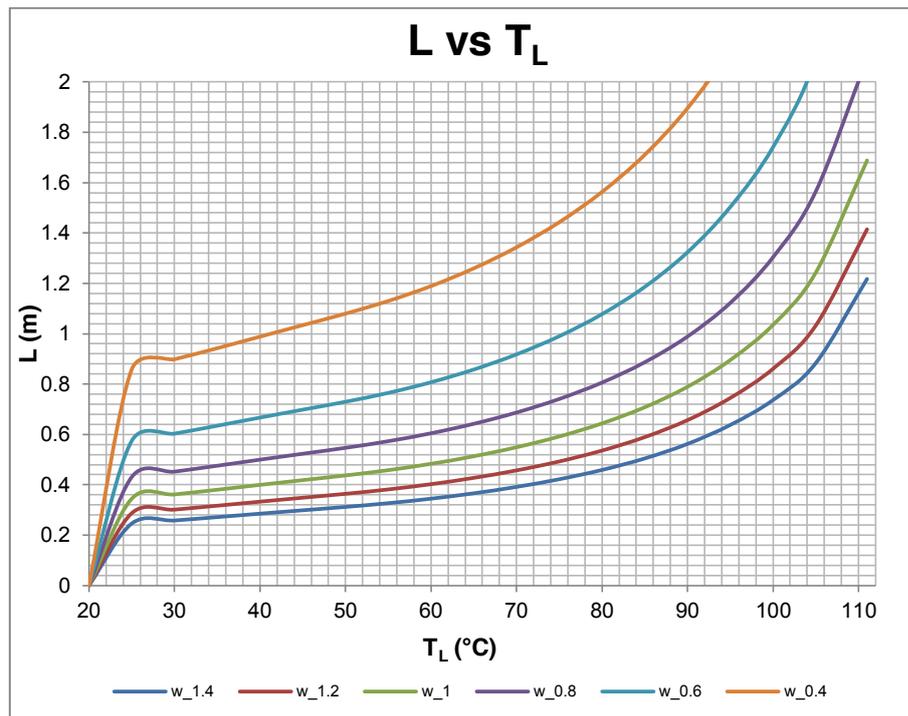
**Figura 39. Comportamiento en el tiempo de la temperatura superficial del lecho, para diferentes espesores del lecho**

De la figura 39, se puede observar que a un mayor espesor del lecho de rocas el tiempo para llegar a la temperatura de estabilización aumenta y considerando que la radiación solar que se puede utilizar por día es de alrededor de 4 horas, resulta conveniente escoger un espesor que este entre 0.04-0.05 m, obteniendo así una temperatura del lecho entre 90-105 °C aproximadamente.



**Figura 40. Eficiencia del colector vs la temperatura del lecho, para diferentes alturas del colector**

Al analizar la figura 40 se observa que para alturas de colector que se encuentren entre 0.04-0.05 m, la eficiencia para una temperatura que vaya de 90-105 °C, es aproximadamente del 32 al 40%, cabe mencionar que la eficiencia del colector, no se relaciona con la longitud del mismo, ni con el espesor del lecho de rocas. Esta dependerá únicamente de la separación que exista entre el lecho de rocas y la cubierta de vidrio, a medida que esta separación aumente las pérdidas por la parte superior se incrementan de manera proporcional, esto sucede debido a que el coeficiente de convección en el interior disminuye provocando que la temperatura del lecho aumente y por ende las pérdidas de calor desde el lecho hacia el ambiente.



**Figura 41. Longitud del colector en función de la temperatura del lecho para diferentes anchos de colector**

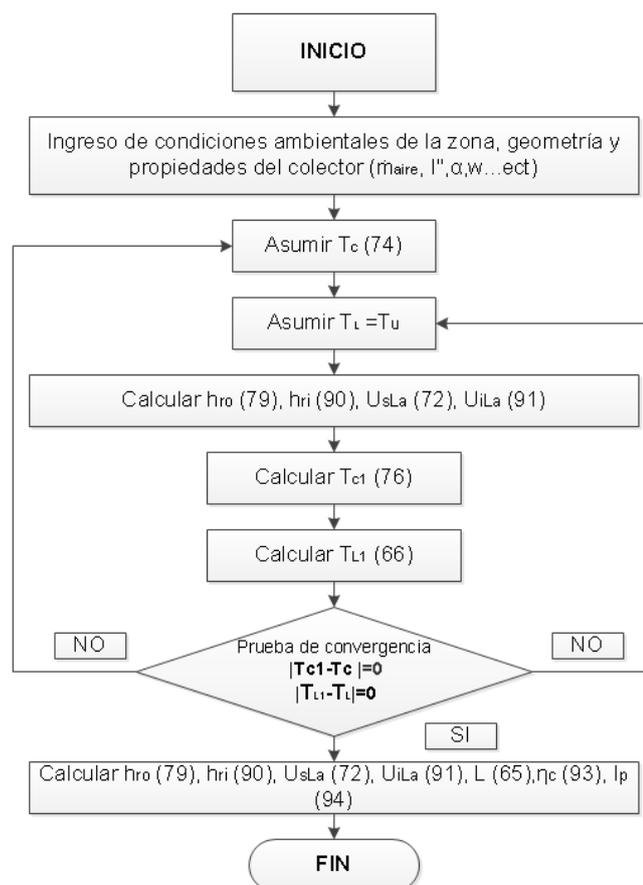
Como se observa en la figura 41, mientras aumenta la temperatura del lecho, se requiere una longitud de colector mayor, con el objetivo de asegurar una temperatura adecuada en el interior del colector es recomendable escoger temperaturas superiores a los 90°C, puesto que la temperatura del lecho real es el promedio entre la temperatura máxima escogida y la temperatura ambiente.

Además áreas de colección más grandes permiten almacenar mayor cantidad de energía, por lo que se escoge un valor de ancho del colector de 0.6 m, que permite asegurar que la temperatura en el interior del colector sea mayor a la requerida a la salida del mismo. De las curvas del modelo se obtuvo las siguientes dimensiones del colector:

**Tabla 15.**  
**Dimensiones del colector**

| Dimensiones del colector |        |
|--------------------------|--------|
| Símbolo                  | Valor  |
| a                        | 0.05 m |
| w                        | 0.6 m  |
| L                        | 2 m    |

En la tabla 15 se muestra los resultados del proceso iterativo en base al modelo matemático desarrollado, para el comportamiento térmico del colector (ecuación 65). El proceso seguido se muestra en el diagrama de flujo de la figura 42, y los resultados del mismo se muestran en el (ANEXO D).



**Figura 42. Diagrama de flujo del proceso iterativo**

**Tabla 16.**  
**Resultados del modelo matemático**

| Resultados del modelo matemático del colector<br>L= 2 m w = 0.6 m a = 0.05 m |                           |                             |                           |                              |
|--|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| $T_{Le}$   | $T_{Lmax}$                | $T_{Lm}$                    | $T_c$                     | $T_m$                        |
| 111 °C   | 105 °C                    | 62.5 °C                     | 33 °C                     | 62.47 °C                     |
| $h_{ro}$   | $h_{ri}$                  | $h_i$                       | $U_{sLa}$                 | $U_{iLa}$                    |
| $8.35 \frac{W}{m^2 \cdot K}$   | $9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $2.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ | $0.52 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ |

Dónde:

$T_{Le}$  = Temperatura superficial del lecho de rocas en estado transitorio (°C)

$T_{Lmax}$  = Temperatura superficial del lecho de rocas máxima (°C)

$T_{Lm}$  = Temperatura superficial media del lecho de rocas (°C)

### 3.2.5 EFICIENCIA TÉRMICA DEL COLECTOR

La eficiencia del colector-almacenador se define como la relación entre la energía aprovechada por el sistema y la energía solar incidente en el lecho de rocas.

$$\eta_{cl} = \frac{q_{neto}}{I''} * 100 \quad (92)$$

$$\eta_{cl} = \frac{I'' - I_P''}{I''} * 100 \quad (93)$$

Dónde:

$\eta_{cl}$  = Eficiencia del colector (%)

$q_{neto}$  = Energía aprovechada por el sistema (W)

$I_P''$  = Pérdidas de calor desde el lecho de rocas hacia el ambiente (W/m<sup>2</sup>)

Las pérdidas de calor del colector se las calcula de la siguiente forma

$$I_P'' = U_{sLa} * (T_L - T_{\infty}) \quad (94)$$

$$I_p'' = 7 * (105 - 20)$$

$$I_p'' = 587.36 \frac{W}{m^2}$$

Remplazando los valores se obtiene que la eficiencia del colector es:

$$\eta_{cl} = \frac{922.5 - 587.36}{922.5} * 100$$

$$\eta_{cl} = 36.3 \%$$

Investigaciones de colectores con similares condiciones muestran que la eficiencia se encuentra alrededor del 30 al 40 %, lo que nos indica que el diseño planteado para el colector está dentro de este rango (Ayadi, Mabrouk, Zouari, & Bellagi, 2014).

### 3.2.6 NÚMERO DE BIOT

La placa absorbente del colector está constituida con rocas esferoides pintadas de negro, y puesto que es de gran importancia que la diferencia de temperaturas entre el lecho de rocas y el fluido, no presente cambios bruscos, es decir que la resistencia interna del sólido sea despreciable, se utiliza el criterio del número de Biot, para determinar el diámetro más adecuado para que la distribución de temperatura sea uniforme. Esto ocurre cuando el número de Biot (Incropera & Dewitt, 1999) es:

$$Bi = \frac{h_i * \phi_r}{2 * k_r} < 0.1$$

Dónde:

$Bi$  = Número de Biot

$\phi_r$  = Diámetro de las rocas (m)

$k_r$  = Coeficiente de conducción de las rocas (2.90 W/m°K)

$$\phi_r < \frac{0.1 * 2 * k_r}{h_i}$$

$$\phi_r < \frac{0.1 * 2 * 2.90}{2.2}$$

$$\phi_r < 0.26 \text{ m}$$

Para lo cual se escoge un diámetro de piedras de aproximadamente 0.04 m.

### 3.2.7 TIEMPO REQUERIDO PARA LLEGAR A LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR

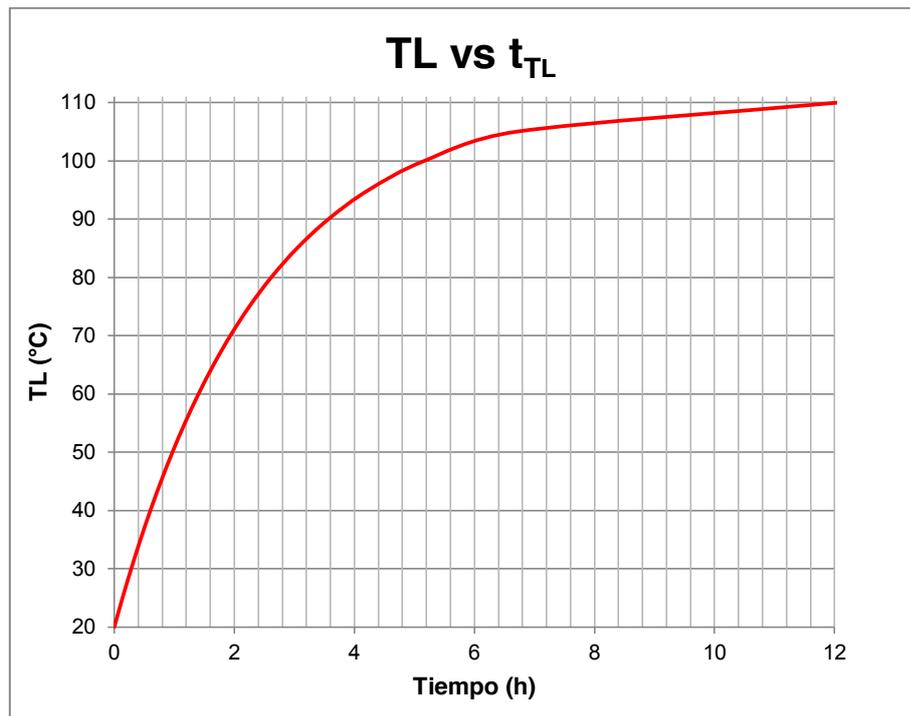
Con el objetivo de establecer el comportamiento de la temperatura en función del tiempo en el lecho, y así determinar la temperatura máxima para el funcionamiento del colector-almacenador que permita calentar el aire necesario para el proceso de secado, con la ayuda de la ecuación 63, y variando el espesor del lecho de rocas (masa de rocas), se obtienen varias curvas en las que a su vez se aprecia el tiempo de estabilización correspondiente. Debido a que el tiempo para alcanzar la temperatura de estado estable es grande se selecciona un lecho cuyo espesor permita alcanzar la temperatura de operación del colector en un tiempo adecuado, con la siguiente ecuación:

$$t_{T_L} = - \frac{\ln\left(\frac{T_L * J - M}{T_a * J - M}\right)}{J} \quad (95)$$

$$t_{T_L} = - \frac{\ln\left(\frac{335 * 0.00011 - 0.044}{293 * 0.00011 - 0.044}\right)}{0.00011}$$

$$t_{T_L} = 5400 \text{ s} \approx 1.50 \text{ h}$$

Como se puede observar en la figura 43 para la temperatura máxima que puede llegar el colector, el tiempo que se requiere es de aproximadamente de 5 horas, y también se puede ver que para la temperatura media del lecho de rocas, el tiempo aproximado para llegar a esta temperatura es 1.50.



**Figura 43 .Comportamiento de la temperatura del lecho durante el tiempo**

### 3.2.8 ENERGÍA ALMACENADA EN EL LECHO DE ROCAS

Para determinar la cantidad de energía almacenada por el lecho de rocas del colector solar durante su periodo de operación y que permitirá disponer de energía para continuar con el proceso de secado, una vez que ya no exista energía solar incidente, se utiliza la ecuación de la primera ley de la termodinámica, la ecuación de la variación de la energía interna en función de la temperatura del lecho y la capacitancia del lecho.

$$\frac{dQ}{dt} = -\dot{E}_a \quad (96)$$

$$\dot{E}_a = \rho_{Lr} * Cp_{Lr} * V_{Lr} * \frac{dT_L}{dt} \quad (97)$$

$$V_{Lr} = \delta_{Lr} * w * L * \varepsilon_r \quad (98)$$

Dónde:

- $\dot{E}_a$  = Energía almacenada (W)  
 $\rho_{Lr}$  = Densidad del lecho de rocas  
 $Cp_{Lr}$  = Calor específico del lecho de rocas  
 $V_{Lr}$  = Volumen del lecho de rocas (m<sup>3</sup>)  
 $\varepsilon_r$  = Porosidad de la roca

Según (Incropera & Dewitt, 1999):

“ La densidad para las rocas y el calor específico son de (2150 kg/m<sup>3</sup>) y (745 J/ kg °K) respectivamente”

(Hamdan, 1998) realizó un estudio sobre el almacenamiento de energía en lecho de rocas en donde determino que la porosidad del lecho es del 40%.

Se deriva la ecuación 63 con respecto al tiempo y reemplazando en la ecuación 97, obteniendo:

$$\dot{E}_a = \rho_{Lr} * Cp_{Lr} * V_{Lr} * (M * e^{-Jt_{he}} - T_a * J * e^{-Jt_{he}}) \quad (99)$$

Dónde:

- $t_{he}$  = Tiempo de helifonía (s)

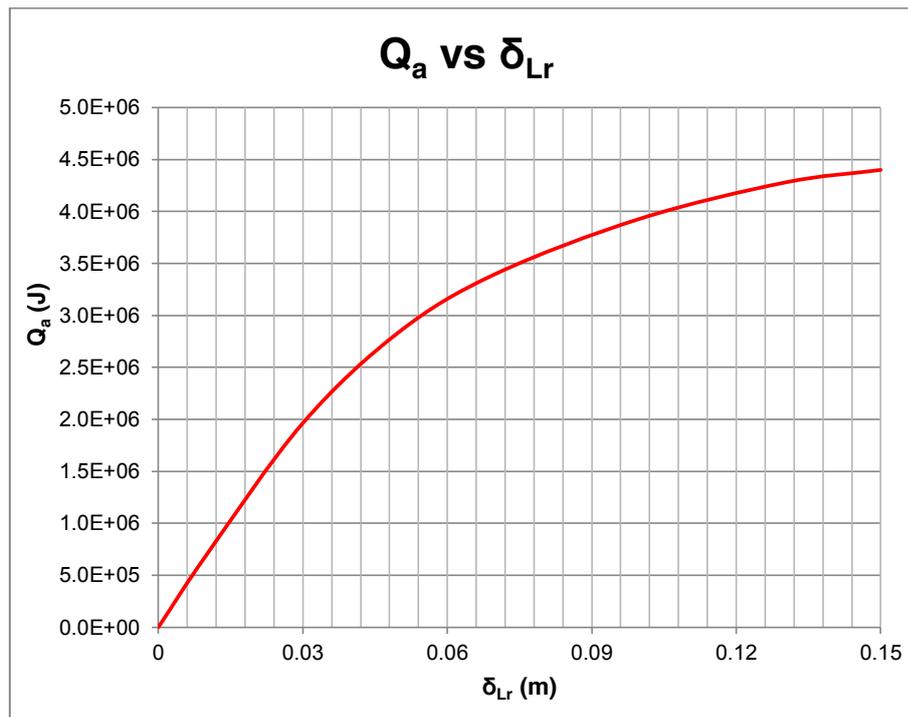
Remplazando la ecuación 99 en 96 e integrando el calor almacenado en función del tiempo es el siguiente:

$$Q_a = \left[ \frac{\rho_{Lr} * Cp_{Lr} * V_{Lr} * (M - T_a * J)}{J} \right] * (e^{-Jt_{he}} - 1) \quad (100)$$

Dónde:

- $Q_a$  = Calor de almacenamiento del lecho de rocas (J)

Debido a la alta capacitancia térmica de las rocas, es importante conocer la cantidad de energía almacenada en el lecho, debido a la ganancia directa de la energía solar en las horas de operación, el cual permitirá prolongar el tiempo de secado, a continuación se muestra el comportamiento del almacenamiento en función del tiempo para varios espesores del lecho.



**Figura 44. Calor almacenado vs el tiempo para varios espesores del lecho**

Como se puede apreciar en la figura 44 a medida que el espesor del lecho aumenta, el efecto de almacenamiento de calor se ve incrementado de igual forma, investigaciones realizadas para almacenamiento en lecho de rocas indican que espesores que se encuentran entre 0.05 y 0.15, garantizan un mejor almacenamiento, por lo que se escoge un espesor de lecho de 0.05 m lo que permite que en 4 horas se obtenga un valor de calor almacenado igual:

$$Q_a = \left[ \frac{2150 * 745 * 0.024 * (0.044 - 293 * 1.1E^{-4})}{1.1E^{-4}} \right] * (e^{-1.1E^{-4} * 4 * 3600} - 1)$$

$$Q_a = -2.84E^6 J$$

El calor almacenado es negativo, porque es un elemento que está saliendo del volumen de control considerado anteriormente para el modelo matemático.

El flujo de calor de almacenamiento puede ser calculado como se muestra a continuación:

$$q_a = \frac{Q_a}{t_{he}} \quad (101)$$

$$q_a = \frac{2.84E^6}{4 * 3600}$$

$$q_a = 197.22 W$$

Dónde:

$q_a$  = Flujo de calor del almacenamiento del lecho de rocas (W)

El almacenamiento nos proporciona una energía adicional después que las horas de brillo solar hayan desaparecido de aproximadamente de un 38%.

### 3.2.9 ORIENTACIÓN DEL COLECTOR-ALMACENADOR

En el uso de energía solar se deben considerar algunos aspectos técnicos para el mejor aprovechamiento de la radiación solar, uno de estos factores es la orientación que debe tener el colector solar; este debe estar ubicado de tal forma que los rayos del sol caigan perpendicular a la superficie de este. El ángulo de inclinación depende de dos parámetros que se deben analizar uno ellos es la latitud a la cual el colector está ubicado que para el caso del Cabuyal es  $0.58^\circ$ , otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es la declinación del sol, la cual varía durante el año, por lo que se debe determinar un ángulo promedio que permita operar durante todas los meses del año.

Según (Ingeniería sin fronteras, 2001):

“Si se va a instalar el colector en el Hemisferio Norte se debe girar el colector hacia el sur, en cambio sí está en el Hemisferio Sur se debe girar al colector hacia el norte, es decir va estar centrado al medio día”.

La pendiente que debe tener el colector para que capte de mejor forma la radiación, se calcula con la ecuación de Duffie, esta es:

$$\beta (n) \approx |\varphi - \delta(n)| \quad (102)$$

Dónde:

$\beta$  = Inclinación (°)

$\varphi$  = Latitud (°)

$\delta$  = Declinación (°)

Según (Abrahão, 2009):

“La declinación se determina para el día típico de cada mes del año, que es el día en el cual la radiación extraterrestre más se aproxima del valor promedio de la radiación solar de todo el mes” (p.15).

El día promedio por cada mes recomendado por Klein en 1967, se muestra en la tabla 17 (Duffie & Beckman, 1980).

**Tabla 17.**

**Conversión de cualquier fecha para un número ordinario de 1 al 365 con valores calculados para el día promedio de cada mes y declinación solar**

| Mes     | n, para i<br>Día típico del mes | Fecha | (n), día del año | ( $\delta$ ), Declinación |
|---------|---------------------------------|-------|------------------|---------------------------|
| Enero   | i                               | 17    | 17               | -20.9                     |
| Febrero | 31+i                            | 16    | 47               | -13                       |
| Marzo   | 59+i                            | 16    | 75               | -2.4                      |

Continúa →

|                   |       |    |     |       |
|-------------------|-------|----|-----|-------|
| <b>Abril</b>      | 90+i  | 15 | 105 | 9.4   |
| <b>Mayo</b>       | 120+i | 15 | 135 | 18.8  |
| <b>Junio</b>      | 151+i | 11 | 162 | 23.1  |
| <b>Julio</b>      | 181+i | 17 | 198 | 21.2  |
| <b>Agosto</b>     | 212+i | 16 | 228 | 13.5  |
| <b>Septiembre</b> | 243+i | 15 | 258 | 2.2   |
| <b>Octubre</b>    | 273+i | 15 | 288 | -9.6  |
| <b>Noviembre</b>  | 304+i | 14 | 318 | -18.9 |
| <b>Diciembre</b>  | 334+i | 10 | 344 | -23   |

Fuente: (DUFFIE, 1980)

Los valores de declinación de la tabla 17 se calculan con la ecuación de Cooper (1969).

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (103)$$

Dónde:

$\delta$  = Declinación (°)

$n$  = Día del mes promedio

Para determinar el ángulo de inclinación más adecuado que se le debe dar para una latitud de 0.58 (Cabuyal), se determina con el promedio del ángulo de inclinación de los días típicos de cada mes como se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 18.**

**Ángulo de inclinación del colector para cada día típico para una latitud de 0.58°**

| Mes            | Latitud ( $\varphi$ ) | Declinación ( $\delta$ ) | Inclinación ( $\beta$ ) | Inclinación absoluta ( $\beta$ ) |
|----------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <b>Enero</b>   | 0.583                 | -20.9                    | 21.483                  | 21.48                            |
| <b>Febrero</b> | 0.583                 | -13                      | 13.58                   | 13.58                            |
| <b>Marzo</b>   | 0.583                 | -2.4                     | 2.98                    | 2.98                             |

**Continúa →**

|                   |       |       |          |       |
|-------------------|-------|-------|----------|-------|
| <b>Abril</b>      | 0.583 | 9.4   | -8.82    | 8.82  |
| <b>Mayo</b>       | 0.583 | 18.8  | -18.22   | 18.22 |
| <b>Junio</b>      | 0.583 | 23.1  | -22.52   | 22.52 |
| <b>Julio</b>      | 0.583 | 21.2  | -20.62   | 20.62 |
| <b>Agosto</b>     | 0.583 | 13.5  | -12.92   | 12.92 |
| <b>Septiembre</b> | 0.583 | 2.2   | -1.62    | 1.62  |
| <b>Octubre</b>    | 0.583 | -9.6  | 10.18    | 10.18 |
| <b>Noviembre</b>  | 0.583 | -18.9 | 19.48    | 19.48 |
| <b>Diciembre</b>  | 0.583 | -23   | 23.58    | 23.58 |
|                   |       |       | Promedio | 14.67 |

De la tabla 18, se obtiene que la inclinación más adecuada es de 15°. A continuación se muestra las dimensiones finales del colector-almacenador.

**Tabla 19.**

**Dimensiones del colector-almacenador**

| <b>Diseño detallado del sistema integrado colector-almacenador</b> |                                  |
|--|----------------------------------|
| <b>Dimensiones</b>   | 2 x 0.6 x 0.1m                   |
| <b>Área de colección</b>   | 1.2 m <sup>2</sup>               |
| <b>Placa absorbente</b>  | Lecho de rocas pintadas de negro |
| <b>Material de aislamiento</b>                                     | Poliestireno expandido           |
| <b>Espesor del aislamiento</b>                                     | 0.10 m                           |
| <b>Espesor de la cubierta de vidrio</b>                            | 4 mm                             |
| <b>Espacio entre la cubierta de vidrio</b>                         | 0.05 m                           |
| <b>Ángulo de inclinación</b>                                       | 15°                              |
| <b>Orientación</b>   | Sur-Norte                        |

**3.2.10 EFICIENCIA DEL SECADOR**

La eficiencia del secado se define como la relación entre la energía utilizada y la suma de la energía perdida en el aire más la energía utilizada (Earle & Earle, 2015).

$$\eta_{sc} = \frac{T_u - T_2}{T_u - T_\infty} * 100\% \quad (104)$$

$$\eta_{sc} = \frac{57 - 27}{57 - 20} * 100\%$$

$$\eta_{sc} = 81\%$$

Dónde:

$\eta_{sc}$  = Eficiencia del secador (%)

$T_2$  = Temperatura del aire a la salida de la cámara de secado (°C)

### 3.2.11 EFICIENCIA DEL SISTEMA

Según (Russon, Dunn, & Steele, 2009):

“ La eficiencia total puede ser calculada como el producto de la eficiencia del colector y la eficiencia del secador ”(p.5)., con la siguiente ecuación:

$$\eta_{si} = \eta_{cl} * \eta_{sc} * 100\% \quad (105)$$

$$\eta_{si} = 0.36 * 0.83 * 100\%$$

$$\eta_{si} = 29.88 \%$$

Dónde:

$\eta_{si}$  = Eficiencia del sistema (%)

### 3.2.12 CAÍDAS DE PRESIÓN EN EL SISTEMA DE SECADO INDIRECTO

En esta sección se determina las pérdidas de presión en el colector-almacenador y en el lecho de ají, además se determina la altura adecuada de la chimenea, que permita dar un tiro suficiente para evacuar el aire hacia el exterior y así facilitar al movimiento del aire dentro del colector.

$$P_{chi} = \Delta P_{Lají} + \Delta P_{cl} + \Delta P_{chi} + \Delta P_{re} + \Delta P_{rchi} - \Delta B_{si} \quad (106)$$

Dónde:

$P_{chi}$  = Presión en la chimenea

$\Delta P_{Lají}$  = Caída de presión en el lecho de ají (Pa)

$\Delta P_{cl}$  = Caída de presión en el colector (Pa)

$\Delta P_{chi}$  = Caída de presión en la chimenea (Pa)

$\Delta B_{si}$  = Presión de empuje del sistema (Pa)

$\Delta P_{rchi}$  = Caída de presión por reducción en la chimenea (Pa)

$\Delta P_{re}$  = Caída de presión en la malla (Pa)

### Caída de presión en el colector ( $\Delta P_{cl}$ )

Las caídas de presión dentro del colector se producen únicamente por la fuerza de fricción que ocurre dentro de las paredes del mismo, esta se la puede determinar aplicando la ecuación de Atkinson, la cual se muestra a continuación:

$$\Delta P_{cl} = \frac{f_{cl} * \rho_{aTm} * L * Pe_{cl}}{A_{scl}} * v_{cl}^2 \quad (107)$$

$$\Delta P_{cl} = \frac{f_{cl} * \rho_{aTm} * L * (w + a)}{w * a} * v_{cl}^2 \quad (108)$$

Dónde:

$f_{cl}$  = Factor de fricción para el colector

$\rho_{aTm}$  = Densidad del aire a la temperatura  $T_m$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v_{cl}$  = Velocidad en el colector (m/s)

$Pe_{cl}$  = Perímetro mojado en el colector (m)

El factor de fricción para un flujo laminar es:

$$f_{cl} = \frac{64}{Re_{cl}} \quad (109)$$

La densidad del aire a presión de 1 atm, se la calcula a partir de la ecuación descripta por (Burbano & Gordillo, 1990):

$$\rho_{aTm(101.3 \text{ kPa})} = 350.929 * T_m^{-0.9988} \quad (110)$$

$$\rho_{aTm(101.3 \text{ kPa})} = 350.929 * (311.5)^{-0.9988}$$

$$\rho_{aTm(101.3 \text{ kPa})} = 1.134 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Debido a que la presión en la zona es menor a 101.3 kPa, se realiza la siguiente corrección:

$$\rho_{aTm(87.7 \text{ kPa})} = \frac{P_{(87.7 \text{ kPa})}}{P_{(101.3 \text{ kPa})}} * \rho_{aTm(101.3 \text{ kPa})} \quad (111)$$

$$\rho_{aTm(87.7 \text{ kPa})} = 0.982 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La velocidad en el colector se la puede obtener despejando la ecuación 86, esto es:

$$v_{cl} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aTm} * a * w} \quad (112)$$

$$v_{cl} = \frac{0.015}{0.982 * 0.05 * 0.6}$$

$$v_{cl} = 0.51 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La caída de presión dentro del colector es:

$$\Delta P_{cl} = \frac{64 * 0.982 * 2 * (0.6 + 0.05)}{2399 * 0.6 * 0.05} * 0.51^2$$

$$\Delta P_{cl} = 0.29 \text{ Pa}$$

### Caída de presión en el lecho de ají ( $\Delta_{Laji}$ )

El aire al atravesar un lecho sólido con una determinada porosidad, genera fuerzas de fricción que ocasiona una disminución en la energía del aire lo que se ve reflejada en una disminución en la presión de empuje, esta caída de presión puede ser obtenida aplicando la ecuación de Kreith para lechos fijos la cual se muestra a continuación:

$$\Delta P_{Laji} = \frac{\delta_{Laji} * Re_{Laji} * \mu_{Ti}^2}{\rho_{aTi} * \phi_{aji}^3} * \frac{(1 - \epsilon_{Laji})^2}{\epsilon_{Laji}^3} \left[ 1.24 \frac{Re_{Laji}}{(1 - \epsilon_{Laji})} + 368 \right] \quad (113)$$

Dónde:

$\Delta P_{La\acute{j}i}$  = Caída de presión en el lecho de ají (Pa)

$\delta_{La\acute{j}i}$  = Espesor del lecho de ají (m)

$Re_{La\acute{j}i}$  = Número de Reynolds en el lecho de ají

$\mu_{T_i}$  = Viscosidad dinámica evaluada a la temperatura  $T_i$  (N s/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{La\acute{j}i}$  = Porosidad del lecho de ají (33 %)

$\rho_{aT_i}$  = Densidad del aire a la temperatura  $T_i$  (kg/m<sup>3</sup>)

$\phi_{a\acute{j}i}$  = Diámetro promedio del ají (0.02 m)

El número de Reynolds en el lecho de ají se lo obtiene con la siguiente ecuación:

$$Re_{La\acute{j}i} = \frac{\dot{m}_{aire} * \phi_{a\acute{j}i}}{A_{La\acute{j}i} * \mu_{T_i}} \quad (114)$$

$$A_{La\acute{j}i} = B_{cs} * D_{cs} * \varepsilon_{La\acute{j}i} \quad (115)$$

Dónde:

$Re_{La\acute{j}i}$  = Número de Reynolds en el lecho de ají

$A_{La\acute{j}i}$  = Área del lecho de ají (m<sup>2</sup>)

De la ecuación 82 la viscosidad dinámica evaluada a la temperatura  $T_i$  es:

$$\mu_{T_i} = \frac{\left(1.4676E^{-6} * (T_i)^{\frac{3}{2}}\right)}{107.87 + T_i}$$

$$\mu_{T_i} = \frac{\left(1.4676E^{-6} * (328)^{\frac{3}{2}}\right)}{107.87 + 328}$$

$$\mu_{T_i} = 2E^{-5} \frac{N s}{m^2}$$

Remplazando en la ecuación 114 se obtiene la siguiente la ecuación del número de Reynolds en el lecho de ají:

$$Re_{Laji} = \frac{0.015 * 0.02}{0.6 * 1.2 * 0.50 * 2E^{-5}}$$

$$Re_{Laji} = 41.66$$

La densidad a la temperatura  $T_i$ , se la calcula con la ecuación 110

$$\rho_{aTi(101.3 \text{ kPa})} = 350.929 * T_i^{-0.9988}$$

$$\rho_{aTi(101.3 \text{ kPa})} = 1.077 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Debido a que la presión en la zona es menor a 101.3 kPa, se realiza la siguiente corrección:

$$\rho_{aTi(87.7 \text{ kPa})} = \frac{P_{(87.7 \text{ kPa})}}{P_{(101.3 \text{ kPa})}} * \rho_{aTi(101.3 \text{ kPa})}$$

$$\rho_{aTi(87.7 \text{ kPa})} = 0.933 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La caída de presión en el lecho de ají es:

$$\Delta P_{aji} = \frac{4 * 0.045 * 41.66 * (2E^{-5})^2}{0.933 * 0.02^3} * \frac{(1 - 0.33)^2}{0.33^3} \left[ 1.24 \frac{41.66}{(1 - 0.33)} + 368 \right]$$

$$\Delta P_{aji} = 3.7 \text{ Pa}$$

### Caída de presión en la chimenea ( $\Delta P_{chi}$ )

Las caídas de presión dentro de la chimenea se producen únicamente por la fuerza de fricción:

$$\Delta P_{chi} = \frac{f_{chi} * \rho_{aTi} * h_{chi} * P_{e_{chi}}}{A_{f_{chi}}} * v_{chi}^2 \quad (116)$$

$$\Delta P_{chi} = \frac{4 * f_{chi} * \rho_{aTi} * h_{chi}}{\phi_{chi}} * v_{chi}^2 \quad (117)$$

Dónde:

$f_{chi}$  = Factor de fricción para la chimenea

$\rho_{aTi}$  = Densidad del aire evaluada a la temperatura  $T_i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v_{chi}$  = Velocidad en la chimenea ( $\text{m}/\text{s}$ )

$P_{e_{chi}}$  = Perímetro mojado de la chimenea (m)

$H_{chi}$  = Altura de la chimenea (m)

Para determinar si el flujo de aire dentro de la chimenea se encuentra en régimen laminar o turbulento, se calcula el número de Reynolds como se indica a continuación:

$$Re_{chi} = \frac{4 * m_{aire}}{\pi * \phi_{chi} * \mu_{Ti}} \quad (118)$$

Dónde:

$Re_{chi}$  = Número de Reynolds en la chimenea

Estudios realizados para secadores de alimentos recomiendan que el diámetro de la chimenea este entre 10-20 cm, para secadores solares indirectos, de esta forma se escoge un diámetro igual a 15 cm (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010).

El número de Reynolds es:

$$Re_{chi} = \frac{4 * m_{aire}}{\pi * \phi_{chi} * \mu_{Ti}}$$

$$Re_{chi} = \frac{4 * 0.015}{\pi * 0.15 * 2E^{-5}}$$

$$Re_{chi} = 6366.20$$

Según (Incropera & Dewitt, 1999):

Debido a que  $Re_{chi} \lesssim 2E^4$ , el factor de fricción es igual a:

$$f_{chi} = 0.316 * (Re_{chi})^{-\frac{1}{4}} \quad (119)$$

$$f_{chi} = 0.316 * (6366.20)^{-\frac{1}{4}}$$

$$f_{chi} = 0.035$$

La velocidad promedio del aire dentro de la chimenea es:

$$v_{chi} = \frac{4 * \dot{m}_{aire}}{\rho_{aTi} * \pi * \phi_{chi}^2} \quad (120)$$

$$v_{chi} = \frac{4 * 0.015}{0.933 * \pi * 0.15^2}$$

$$v_{chi} = 0.9 \frac{m}{s}$$

### Caída de presión en la malla ( $\Delta P_{re}$ )

La caída de presión en la malla, según (Costales, Estudio del secado de granos mediante fluidización, 1990) es aproximadamente el 10% de la caída de presión en el lecho de ají.

$$\Delta P_{re} = 0.10 * \Delta P_{aji} \quad (121)$$

$$\Delta P_{re} = 0.37 Pa$$

### Caída de presión en la reducción ( $\Delta P_{rchi}$ )

La caída de presión debido a la reducción en la chimenea viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_{rchi} = k_{chi} * \frac{v_{chi}^2}{2} \quad (122)$$

Dónde:

$k_{chi}$  = Coeficiente de pérdidas para contracciones graduales

De la figura 45, se obtiene el coeficiente de pérdidas para lo cual se realiza la relación entre el área de la sección transversal de la chimenea y el área de la cámara de secado, la cual se muestra a continuación:

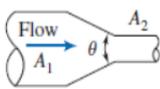
$$\frac{\pi * \frac{\phi_{chi}^2}{4}}{B_{cs} * P_{cs}}$$

$$\frac{\pi * \frac{0.15^2}{4}}{0.6 * 1.2}$$

$$0.025$$

Para que la reducción no sea tan brusca el ángulo de inclinación será igual a 30°.

Loss Coefficients ( $K$ ) for Gradual Contractions: Round and Rectangular Ducts

|   | $A_2/A_1$ | Included Angle, $\theta$ , Degrees |       |       |      |      |      |      |
|---|-----------|------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|
|   |           | 10                                 | 15–40 | 50–60 | 90   | 120  | 150  | 180  |
|  | 0.50      | 0.05                               | 0.05  | 0.06  | 0.12 | 0.18 | 0.24 | 0.26 |
|   | 0.25      | 0.05                               | 0.04  | 0.07  | 0.17 | 0.27 | 0.35 | 0.41 |
|   | 0.10      | 0.05                               | 0.05  | 0.08  | 0.19 | 0.29 | 0.37 | 0.43 |

Note: Coefficients are based on  $h_L = K(V_2^2/2)$ .

Source: Data from ASHRAE [12].

**Figura 45. Coeficientes de pérdidas (k) para contracciones graduales**

FUENTE: (Pritchard & Leylegian, 2011)

La caída de presión en la reducción de la chimenea es:

$$\Delta P_{rchi} = 0.04 * \frac{0.9^2}{2}$$

$$\Delta P_{rchi} = 0.016 Pa$$

### Presión de empuje en el sistema ( $\Delta B_{si}$ )

La fuerza de Boyantez, es un fenómeno producido por el aumento de la presión del fluido, debido a que se producen un cambio de densidades, esta a su vez es una fuerza normal a la superficie por la cual se mueve el fluido. La Fuerza de Boyante puede ser expresada de la siguiente forma:

$$F_B = \rho * g * \beta * \Delta T \quad (123)$$

La fuerza de Boyante perpendicular que se produce por el cambio de densidades en el colector es:

$$F_{Bsi} = \rho_{Tm} * g * \beta t_{Tm} * (T_u - T_a) \quad (124)$$

Dónde:

$F_{Bsi}$  = Fuerza de Boyante del sistema (N/m<sup>3</sup>)

$g$  = Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$\beta t_{Tm}$  = Coeficiente térmico de expansión volumétrica a la temperatura  $T_m$ (°K<sup>-1</sup>)

Remplazando los valores la fuerza de Boyante perpendicular es:

$$F_{Bsi} = 0.982 * 9.8 * \frac{1}{311.5} * (330 - 293)$$

$$F_{Bsi} = 1.14 \frac{N}{m^3}$$

La fuerza que permite el movimiento del fluido dentro del colector depende de la inclinación del mismo, para este caso a 15°:

$$F_{Bsi(15^\circ)} = F_{Bsi} * \sin 15^\circ \quad (125)$$

$$F_{Bsi(15^\circ)} = 1.14 * \sin 15^\circ \frac{N}{m^3}$$

$$F_{Bsi(15^\circ)} = 0.295 \frac{N}{m^3}$$

Dónde:

$F_{Bsi(15)}$  = Fuerza de Boyante a 15°(N/m<sup>3</sup>)

Como al momento de llegar a la cámara de secado el fluido cambia la dirección de su sentido se determina con la fuerza de Boyante perpendicular.

La presión de empuje en el lecho está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta B_{si} = \frac{F_{Bsi} * V_{cs}}{A_{Lg}} \quad (126)$$

$$\Delta B_{si} = \frac{1.14 * (0.6 * 1.2 * 1.10)}{(0.6 * 1.2)}$$

$$\Delta B_{si} = 1.26 \text{ Pa}$$

Dónde:

$V_{cs}$  = Volumen en la cámara de secado (m<sup>3</sup>)

$A_{Lg}$  = Área del lecho de granos (m<sup>2</sup>)

La chimenea es el elemento de desfogue del flujo de aire, la cual será diseñada con una velocidad suficiente que permita que el aire fluya y salga hacia el exterior. Reemplazando las caídas de presión en la ecuación 106, se tiene:

$$\rho_{aTi} * g * H_{chi} = 3.7 + 0.29 + 0.70 * H_{chi} + 0.37 + 0.016 - 1.26 \quad (127)$$

Despejando de la ecuación 127, el tiro de la chimenea es:

$$H_{chi} = \frac{3.7 + 0.29 + 0.37 + 0.016 - 1.26}{0.933 * 9.8 - 0.7}$$

$$H_{chi} = 0.37 \text{ m}$$

$$H_{chi} \approx 0.40 \text{ m}$$

### 3.2.13 SEPARACIÓN DE LA CHIMENEA AL SOMBRERETE

El sombrerete es un elemento que tiene como principal función: facilitar la evacuación del aire hacia el exterior, impedir la entrada de lluvia, granizo u otros agentes atmosféricos que obstaculicen la conducción, la distancia que debe tener hacia la campana para no frenar el tiro se calcula con la siguiente fórmula:

$$H_{sca} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{Ta} * v_{chi} * \Phi_{chi}} \quad (128)$$

$$H_{sca} = \frac{0.015}{1.044 * 0.9 * 0.15}$$

$$H_{sca} = 0.10 \text{ m}$$

Dónde:

$H_{sca}$  = Altura de separación a la campana(m)

## 3.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE SECADO

Para el diseño de la estructura tanto de la cámara de secado como del soporte del colector se utiliza el código AISC-ASD89, realizando la simulación de dichas estructuras con la ayuda de un programa de elementos finitos. Para la selección del material con el que se va a construir las estructuras que conforman el sistema de secado se realiza una selección por medio de un matriz de puntos ponderados, siguiendo el mismo procedimiento que se empleó para la selección del espesor del lecho de ají.

**Tabla 20.**

**Matriz de pesos ponderados para la selección del material para la estructura**

| Material estructural   |                           | A36  |      | A 572 Gr. 50 |      | A588    |      |         |
|------------------------|---------------------------|------|------|--------------|------|---------|------|---------|
| Criterio de evaluación |                           | W.F. | R.F. | Calif.1      | R.F. | Calif.2 | R.F. | Calif.3 |
| 1                      | Resistencia a la fluencia | 0.20 | 7    | 1.38         | 8    | 1.58    | 9    | 1.78    |
| 2                      | Resistencia a la ruptura  | 0.16 | 9    | 1.47         | 7    | 1.14    | 6    | 0.98    |

Continua →

|          |                            |             |    |             |   |             |   |             |
|----------|----------------------------|-------------|----|-------------|---|-------------|---|-------------|
| <b>3</b> | Ductilidad                 | 0.17        | 9  | 1.57        | 4 | 0.70        | 9 | 1.57        |
| <b>4</b> | Resistencia a la corrosión | 0.14        | 7  | 0.98        | 5 | 0.70        | 8 | 1.12        |
| <b>5</b> | Costo                      | 0.10        | 10 | 1.05        | 3 | 0.31        | 3 | 0.31        |
| <b>6</b> | Material comercial         | 0.10        | 10 | 1.05        | 6 | 0.63        | 1 | 0.10        |
| <b>7</b> | Soldabilidad               | 0.06        | 10 | 0.58        | 5 | 0.29        | 8 | 0.47        |
| <b>8</b> | Maquinabilidad             | 0.06        | 8  | 0.47        | 6 | 0.35        | 7 | 0.41        |
|          |                            | <b>1.00</b> |    | <b>8.53</b> |   | <b>5.70</b> |   | <b>6.73</b> |

De la tabla 20, se obtiene que el material más adecuado para la construcción de los elementos estructurales del sistema de secado, es el acero estructural ASTM A 36.

### 3.3.1 ESTRUCTURA DEL SOPORTE DEL COLECTOR

Es una estructura tipo bastidor inclinada a 15° con respecto a la horizontal conformada por cuatro columnas, entre las cuales se encuentra cuatro vigas, y en la parte inferior de las columnas, se encuentra unos rigidizadores para dar estabilidad a la misma, el perfil utilizado es un ángulo de lados igual de 50x50x4. La tabla 21 muestra las cargas a las cuales está sometida la estructura del soporte del colector.

**Tabla 21.**

#### **Cargas a las cuales está sometido el soporte del colector**

|                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| <b>Cargas muertas</b>         |                     |
| <b>Peso propio</b>            | 200 kg              |
| <b>Peso de las piedras</b>    | 129 kg              |
| <b>Total carga muerta</b>     | 329 kg              |
| <b>Cargas vivas</b>           |                     |
| <b>Carga de apoyo lateral</b> | 20 kg               |
| <b>Total carga vivas</b>      | 20 kg               |
| <b>Carga de viento</b>        |                     |
| <b>Viento</b>                 | 30kg/m <sup>2</sup> |

Para el diseño de la estructura del bastidor del colector se utilizan los criterios de la norma AISC, realizando el cálculo únicamente para el elemento más crítico, que en este caso es la viga lateral del soporte ya que la distancia entre apoyos es de 2 m, por lo que se realiza el diseño para este

elemento que está sometido a flexión. Para determinar la carga de diseño se usa el método de factores de carga y resistencia, de donde se tiene que .

$$Q_d = 1.2 * D_c + 1.3 * W_c \quad (129)$$

$$Q_d = 1.2 * 627.2 + 1.3 * 98$$

$$Q_d = 880.04 \frac{N}{m}$$

Dónde:

$D_c$  = Carga muerta (N/m)

$W_c$  = Carga de viento (N/m)

Para la selección del perfil se lo realiza utilizando el concepto del módulo de sección plástica requerida, según la AISC este módulo viene dado por la siguiente ecuación:

$$Z_{req} = \frac{M_{max}}{0.9 * F_y} \quad (130)$$

Dónde:

$Z_{req}$  = Módulo de sección plástica (m<sup>3</sup>)

$M_{max}$  = Momento de diseño (N m)

$F_y$  = Punto de fluencia del acero ASTM A 36 (MPa)

La AISC, establece que el momento y cortante de diseño se lo puede calcular con las siguientes ecuaciones:

$$M_{max} = \frac{Q_d * l^2}{8} \quad (131)$$

$$V_{max} = \frac{Q_d * l}{2} \quad (132)$$

Dónde:

$l$  = longitud de la viga (m)

Remplazando la carga de diseño y la longitud de la viga en las ecuaciones 131 y 132, se tiene que:

$$M_{max} = 440.02 \text{ N} * m$$

$$V_{max} = 880.04 \text{ N}$$

Remplazando el momento de diseño en la ecuación 130 se tiene que el módulo de sección plástica requerida es:

$$Z_{req} = \frac{440.02}{0.9 * 248 \text{ E}^6}$$

$$Z_{req} = 2\text{E}^{-6} \text{ m}^3$$

Se selecciona un perfil L de lados iguales de 50x50x4 mm cuyo módulo de sección plástica es de  $5.4 \text{ E}^{-6}$ , si bien es cierto el perfil escogido tiene un valor mayor del requerido, se debe tener en cuenta que sobre el bastidor debe descansar el soporte del lecho de rocas y si el perfil escogido no es lo suficientemente ancho, de forma que brinde una área de contacto donde las cargas se distribuyan al bastidor, este último no estaría cumpliendo el propósito para el cual fue concebido y debido al peso del lecho de piedras el colector fallaría ya que el soporte del lecho estaría transmitiendo la carga de las rocas a la carcasa del colector, razón por la que este perfil cumple este requerimiento de diseño. La norma AISC, establece que para perfiles tipo L de lados iguales, las condiciones para las cuales deben ser diseñadas son las siguientes:

- Estado límite de fluencia
- Pandeo local del alma (LLB)

**Estado límite de fluencia:** La norma establece que la resistencia de flexión nominal  $M_n$ , debe ser menor al valor obtenido del estado límite de fluencia (momento plástico) y mayor al momento de diseño, el cual puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$M_p = F_y * Z_{req} \geq M_{max} \quad (133)$$

$$M_p = 248 E^6 * 5.4 E^{-6} \geq 440.02 Nm$$

$$M_p = 1339.2 Nm \geq 440.02 Nm$$

**Pandeo local del alma LLB:** El estado de pandeo local del alma se la determina con la siguiente ecuación:

$$M_n = F_y * S_c * \left( 2.43 - 1.72 * \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) \geq M_{max} \quad (134)$$

Dónde:

$S_c$  = Módulo elástico de la sección ( $m^3$ )

$E$  = Módulo elástico del acero ASTM A 36

$b$  = Longitud completa del ala del perfil (mm)

$t$  = espesor del perfil (mm)

La norma AISC, establece que para flexión en torno a uno de los ejes geométricos de un ángulo de alas iguales el módulo elástico es 0.8 veces el módulo de sección plástica. Reemplazando los datos en la ecuación 134 se tiene que:

$$M_n = 1792.28 Nm \geq 440.02 Nm$$

El perfil seleccionado a cumplido tanto el estado límite de fluencia como del pandeo del alma, por lo que no fallara por flexión, en el segmento escogido.

Para tener una mayor seguridad con el diseño propuesto se plantea realizar una análisis de rigidez del soporte del colector, para lo cual se utiliza el teorema de Castigliano, el cual dice:

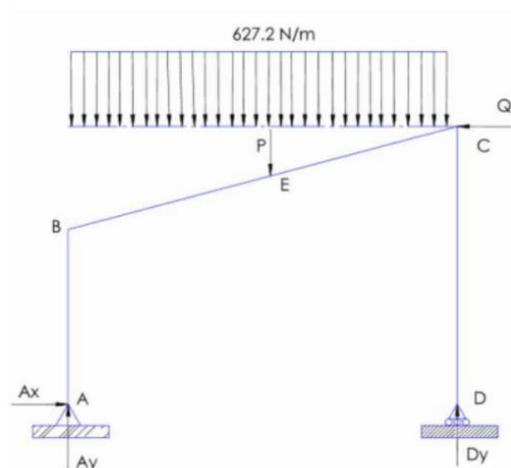
“ La componente de desplazamiento del punto de aplicación de una acción sobre una estructura en la dirección de dicha acción, se puede

obtener evaluando la primera derivada parcial de la energía interna de deformación de la estructura con respecto a la acción aplicada”

Cuya ecuación es:

$$\Delta P = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{\partial}{\partial P} \left[ \int \frac{N^2}{2AE} dx + \int \frac{M^2}{2EI} dx + \int \frac{V^2}{2GA} dx + \int \frac{T^2}{2GJ} dx \right] \quad (135)$$

A continuación se muestra el estudio de rigidez del bastidor del colector



Desplazamiento en portico

$$\theta := \frac{15 \pi}{180}$$

$$q_x := 64.9.8 \sin(\theta) = 162.33 \quad \frac{N}{m}$$

$$q_y := 64.9.8 \cos(\theta) = 605.83 \quad \frac{N}{m}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$2P - Q \cdot 0.92 - Dy \cdot 2 + 627.2 \cdot 2 = 0$$

$$P - 0.46Q + 627.2$$

$$Dy = P - 0.46Q + 627.2$$

$$\Sigma Fy = 0$$

$$Ay + P - 0.46Q + 627.2 - P - 627.2 = 0$$

$$0.46Q + 627.2$$

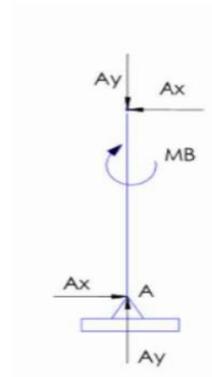
$$Ay = 0.46Q + 627.2$$

$$\Sigma Fx = 0$$

$$Ax = Q$$

Tramo AB

$$M_{AB} = Q x$$



Energía por carga axial

$$U_1 = \frac{1}{2} \int_0^{0.4} \frac{(0.46 Q + 627.2)^2}{AE} dx$$

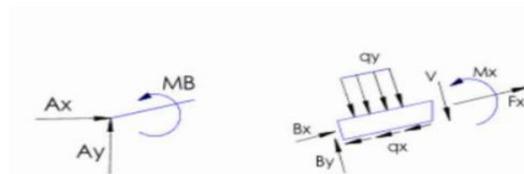
$$U_1 = \frac{0.085 Q^2 + 230.81 Q + 157351.94}{2 AE}$$

Energía por flexión

$$U_2 = \frac{1}{2} \int_0^{0.4} \frac{(Q x)^2}{EI} dx$$

$$U_2 = \frac{0.011 Q^2}{EI}$$

Tramo BX



$$\Sigma M_x = 0$$

$$B_x = Q \cos(\theta) + (0.46 Q + 627.2) \sin(\theta)$$

$$B_y = -Q \sin(\theta) + (0.46 Q + 627.2) \cos(\theta)$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_x + [Q \cos(\theta) + (0.46 Q + 627.2) \sin(\theta)] - q_x \frac{x}{L2} = 0$$

$$F_x = \frac{q_x x}{L2} - Q \cos(\theta) - \sin(\theta) (0.46 Q + 627.2)$$

$$M2 + q_y x \frac{x}{2} + [-Q \sin(\theta) + (0.46 Q + 627.2) \cos(\theta)] x = 0$$

$$M2 = Q x \sin(\theta) - 0.5 q_y x^2 - 0.46 Q x \cos(\theta) - 627.2 x \cos(\theta)$$

$$L2 := 1$$

$$U_3 = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\left[ \frac{q_x x}{L2} - Q \cos(\theta) - \sin(\theta) (0.46 Q + 627.2) \right]^2}{AE} dx \quad U_4 = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\left( Q x \sin(\theta) - 0.5 q_y x^2 - 0.46 Q x \cos(\theta) - 627.2 x \cos(\theta) \right)^2}{EI} dx$$

$$U_3 = \frac{1.18 Q^2 + 176.13 Q + 8783.82}{2 AE}$$

$$U_4 = \frac{0.011 Q^2 + 103.020 Q + 232451.31}{2 EI}$$

Tramo DC

$$D_y = P - 0.46 Q + 627.2$$

$$U7 = \frac{1}{2} \int_0^2 \frac{(P - 0.46 Q + 627.2)^2}{AE} dx$$

$$U7 = \frac{(P - 0.46 Q + 627.2)^2}{AE}$$

$$UT = U1 + U2 + U3 + U4 + U5 + U7$$

$$UT = \frac{83067.8 EI + 203.5 EI Q + 0.01 AE Q^2 + 0.6 EI Q^2}{AE EI} + \dots$$

$$+ \left( \frac{0.01 Q^2 + 103.02 Q + 232451.3}{2 EI} + \frac{0.1 P^2 - 1.1 P Q - 2.3e-14 P + 2.4 Q^2 + 9.6e-14 Q + 17567.6}{2 AE} + \dots \right)$$

$$\left[ \dots + \frac{(P - 0.5 Q + 627.2)^2}{AE} \right]$$

$$\Delta E = \frac{d}{dP}(UT)$$

$$\Delta E = \frac{2 P + -0.92 Q + 1254.4}{AE} + \frac{0.26 P + -1.12 Q - 2.29e-14}{2 AE}$$

$$PI := 352.8 \quad N$$

$$QI := 196 \quad N$$

$$\Delta E = \frac{2 PI + -0.92 QI + 1254.4}{AsEs} + \frac{0.26 PI + -1.12 QI - 2.29e-14}{2 AsEs}$$

$$\Delta E := \frac{2 PI + -0.92 QI + 1254.4}{As Es} + \frac{0.26 PI + -1.12 QI - 2.29e-14}{2 As Es} = 2.145 \times 10^{-5} \quad m$$

$$\Delta C = \frac{d}{dQ}(UT)$$

$$\Delta C = \frac{-0.92 P + 0.4 Q - 577.02}{AE} + \frac{0.02 Q + 103.02}{2 EI} + \frac{-1.1 P + 4.7 Q + 9.61e-14}{2 AE} + \dots$$

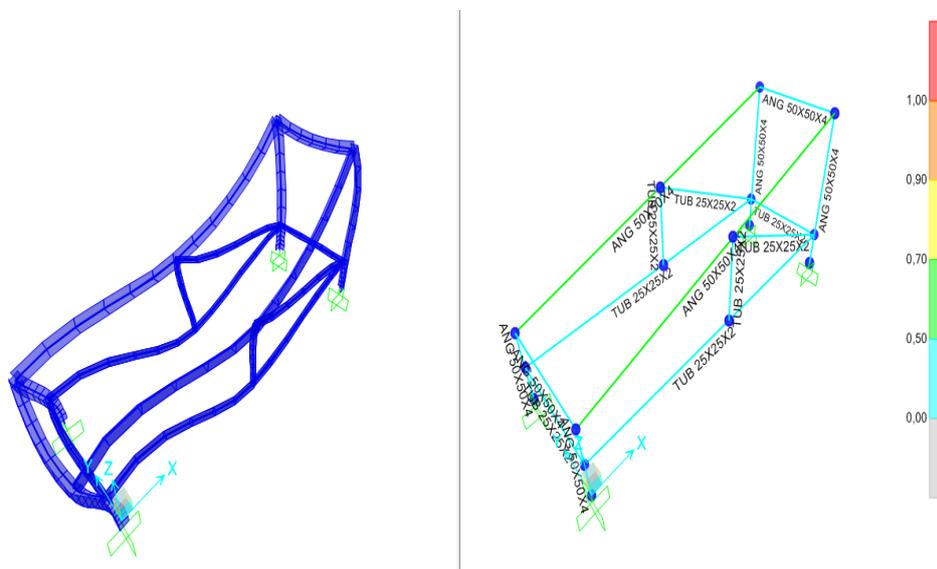
$$+ \frac{203.5 EI + 1.3 EI Q + 0.02 AE Q}{AE EI}$$

$$\Delta C = 2.509 \times 10^{-4} \quad m$$

Del análisis de rigidez se obtuvo que la mayor deflexión que se produce en la estructura del soporte del colector se produjo en la esquina superior de la misma obteniendo un valor de 0.251 mm, el cual es un desplazamiento aceptable y confirma que el perfil escogido es el correcto. Los cálculos de rigidez por el método de castigliano tanto del soporte del colector como el de la estructura de la cámara de secado se los encuentra en el anexo N.

La figura 46 muestra la simulación del soporte del colector elaborada en un software de elementos finitos donde se aprecia que las vigas laterales,

son las que soportan la mayor cantidad de carga, las mismas que utilizan un 50% de la resistencia del perfil.



**Figura 46. Simulación de la estructura del bastidor del colector**

### 3.3.2 ESTRUCTURA DE LA CÁMARA DE SECADO

La estructura de la cámara de secado es de tipo bastidor, compuesta por dos columnas por lado, entre las cuales se encuentran ubicadas cuatro vigas, con un empotramiento fijo en la parte inferior de las columnas. La tabla 22, muestra las cargas a la cual está sometida la estructura.

**Tabla 22.**

#### **Cargas a las cuales está sometida la cámara de secado**

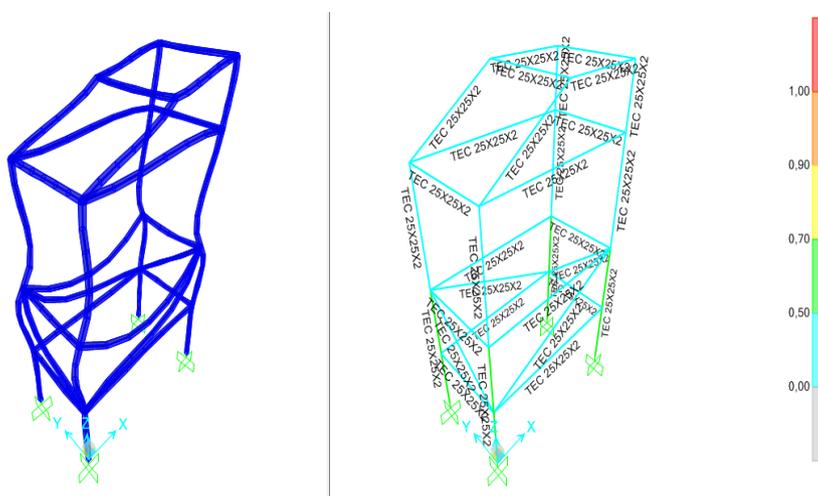
| <b>Cargas muertas</b>         |              |
|-------------------------------|--------------|
| <b>Peso propio</b>            | 16 kg        |
| <b>Peso de la chimenea</b>    | 57 kg        |
| <b>Peso del recubrimiento</b> | 12 kg        |
| <b>Peso de la madera</b>      | 5 kg         |
| <b>Peso de aislante</b>       | 2 kg         |
| <b>Total carga muerta</b>     | <b>92 kg</b> |
| <b>Cargas vivas</b>           |              |
| <b>Peso del ají</b>           | 25 kg        |

**Continúa →**

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| <b>Carga de apoyo lateral</b> | 20 kg                     |
| <b>Carga de apoyo frontal</b> | 20 kg                     |
| <b>Total carga vivas</b>      | <b>65 kg</b>              |
| <b>Carga de viento</b>        |                           |
| <b>Viento</b>                 | <b>30kg/m<sup>2</sup></b> |

De la misma forma que se realizó para la estructura del soporte del colector, se plantea las ecuaciones de energías para realizar el análisis por rigidez de la estructura de la cámara de secado, con la diferencia de que para simplificar el análisis se escogió el pórtico de la parte inferior de la cámara, debido a que este es el elemento más crítico, por estar sometido a las cargas muertas y vivas que se describen en la tabla 22.

De los cálculos realizados por rigidez se tuvo que la deformación máxima se dio en el elemento DC con 105 mm de deformación, el cual es un valor elevado, por lo que para dar una mayor estabilidad a la estructura y mantener el perfil escogido el cual fue un tubo cuadrado de 25x25x2 mm, se procede a colocar rigidizadores en la parte lateral de la estructura en forma de celosía, la figura 47, muestra la simulación realizada a la estructura ya modificada en la cual se puede observar que al colocar los rigidizadores se logró que en el elemento más crítico del sistema se utilice únicamente el 50% de la capacidad del perfil, con lo cual se garantiza que la estructura no falle.



**Figura 47. Simulación de la estructura de la cámara de secado**

## **CAPÍTULO 4**

### **CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS**

En el presente capítulo se describe el proceso de construcción, materiales y las pruebas realizadas al del sistema de secado el cual está compuesto por un colector-almacenador y su cámara de secado, además se indica la instrumentación utilizada para la recopilación de datos en la fase de pruebas.

#### **4.1 PLANOS DEL SISTEMA DE SECADO**

ANEXO A

#### **4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO**

##### **4.2.1 CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR-ALMACENADOR**

El colector-almacenador está formado por un bastidor que es el encargado de soportar al conjunto del colector, el cual está conformado por ángulos estructurales de 50x50x4, tanto para sus columnas como sus vigas, además para dar mayor estabilidad tiene rigidizadores en su parte frontal, lateral y posterior, elaborados con tubo cuadrado de 25x25x2, lo cual se especifica con más detalle en el plano 4 (SSD-19P). El colector está compuesto por una estructura en el interior del mismo, el cual brinda una rigidez en el lecho, en su parte inferior y lateral tiene un aislante con espesor de 100 y 30 mm respectivamente, de poliestireno expandido, un tablero de madera de 10 mm de espesor que se ubica sobre la estructura del lecho de rocas. Todo está recubierto por una plancha de chapa metálica con un espesor de 0.9 mm de ASTM A36. Sobre todo el conjunto descansa un vidrio templado de 4 mm de espesor, el ensamble del colector-almacenador y las partes que lo componen se puede apreciar con mayor detalle en los planos 2-7.

Los materiales y herramientas utilizadas para la fabricación se muestran en la tabla 23 y 24.

**Tabla 23.**

**Materiales para la fabricación del colector-almacenador**

| Item | Descripción                       | Dimensión         | Cantidad  |
|------|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| 1    | Ángulo de acero ASTM A36          | 50 x 50 x 4       | 2         |
| 2    | Tubo cuadrado de acero ASTM A36   | 25 x 25 x 2       | 2         |
| 3    | Plancha de acero ASTM A36         | 2440 x 1220 x 0.9 | 2         |
| 4    | Plancha de poliestireno expandido | 2000 x 1000 x 100 | 1         |
| 5    | Tablero triplex                   | 2440 x 1220 x 9   | 1         |
| 6    | Electrodo celuloso E6011          | 3/16"             | 1/2 kg    |
| 7    | Espuma de poliuretano             | -                 | 1         |
| 8    | Vidrio templado                   | 2000 x 660 x 4    | 1         |
| 9    | Pintura anticorrosiva negro mate  | -                 | 2 litros  |
| 10   | Thinner                           | -                 | 1/2 galón |
| 11   | Perno de anclaje                  | 3/8"              | 16        |
| 12   | Perno autoperforante              | 6-20x1/2"         | 80        |

**Tabla 24.**

**Herramienta e instrumentos de medición**

| Item | Herramienta                 |
|------|-----------------------------|
| 1    | Cizalla de vaivén           |
| 2    | Esmeril                     |
| 3    | Máquina de soldar           |
| 4    | Amoladora                   |
| 5    | Compresor                   |
| 6    | Dobladora de chapa metálica |
| 7    | Taladro de banco y de mano  |
| 8    | Punzón                      |

Continúa →

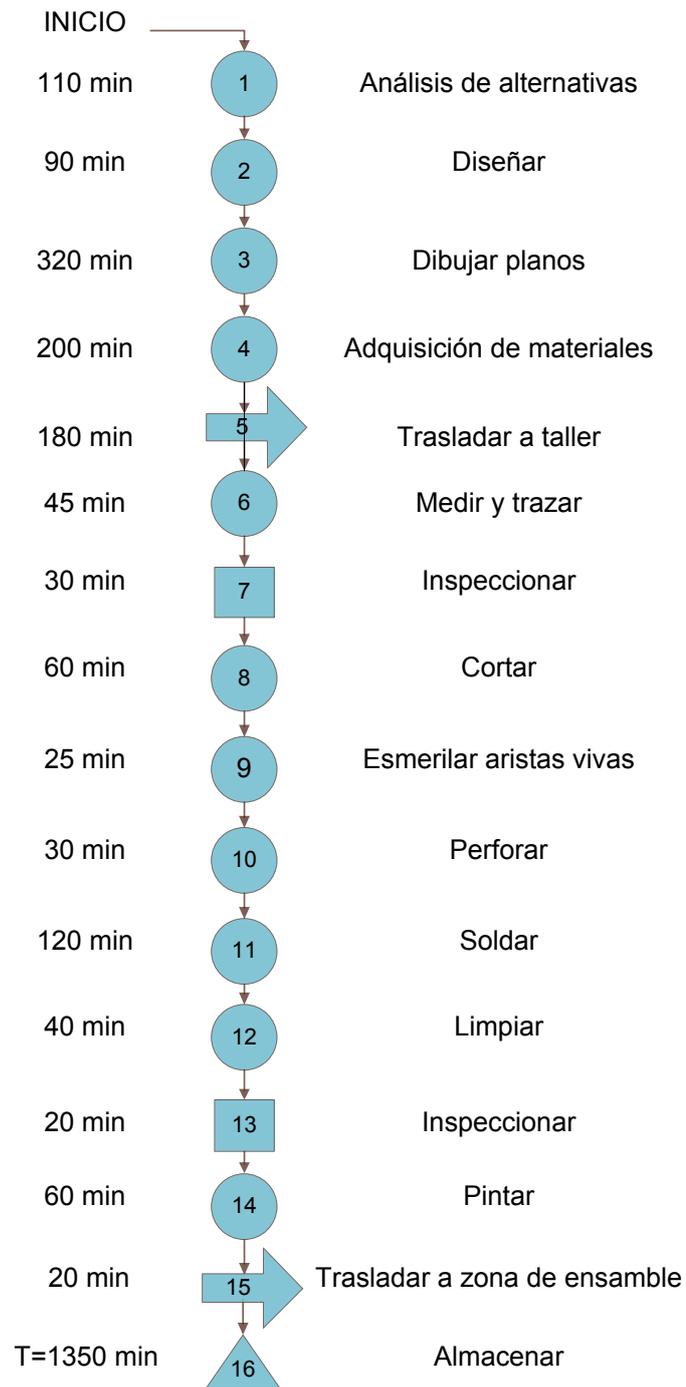
|    |                  |
|----|------------------|
| 9  | Martillo         |
| 10 | Flexómetro       |
| 11 | Calibrador       |
| 12 | Escuadra         |
| 13 | Nivel            |
| 14 | Grata            |
| 15 | Cepillo de acero |
| 16 | Graduador        |
| 17 | Remachadora      |

Las hojas de proceso para la fabricación de colector-almacenar y su bastidor se los puede encontrar en el ANEXO L.

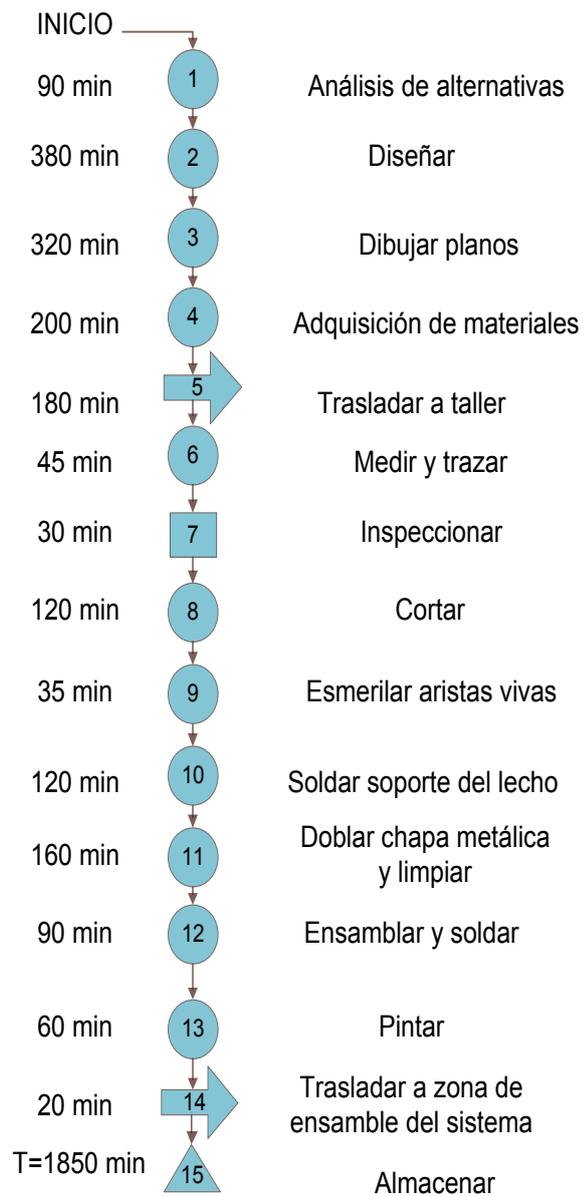
Los diagramas de procesos necesarios para la construcción del colector-almacenador y su bastidor, fueron realizados bajo la norma ASME “Operation and Flow Process Charts” (ASME, 1947) (Jones, 2012), los mismos que se muestran en las figuras 49 y 50 respectivamente.



**Figura 48. Colector-almacenador y su bastidor**



**Figura 49. Diagrama de proceso del bastidor**



**Figura 50. Diagrama de proceso del colector-almacenador**

#### 4.2.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado está formada por las siguientes componentes:

- Estructura
- Recubrimiento interior y exterior
- Bandejas
- Chimenea

Para la construcción de la cámara de secado se utiliza perfiles cuadrados de 25x25x2, en la parte interior esta forrada de una chapa metálica galvanizada de 0.9 mm de espesor para evitar la corrosión, en donde se encuentran ubicados los soportes para las bandejas, los cuales son ángulos de lados iguales de  $\frac{3}{4}$ " x 2, además para dar rigidez se colocan tableros de madera de 10 mm de espesor en toda la estructura, se utiliza como aislante el poliestireno expandido con un espesor de 60 mm. En la parte exterior está recubierta por una lámina metálica de 0.9 mm de espesor y en la parte superior de la cámara de secado se encuentra una chimenea de 400 mm de altura y con un diámetro de 150 mm, fabricada del mismo material del recubrimiento exterior. En la tabla 25 y 26 se indican los materiales y herramientas que se utilizan para la fabricación de la cámara de secado.

**Tabla 25.**

##### **Materiales para la fabricación de la cámara de secado**

| Item | Descripción                          | Dimensión         | Cantidad          |
|------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 1    | Tubo cuadrado ASTM A36               | 25 x 25 x 2       | 5                 |
| 2    | Plancha de acero ASTM A36            | 2440 x 1220 x 0.9 | 2                 |
| 3    | Plancha de acero galvanizada ASTM A6 | 2440 x 1220 x 0.9 | 1                 |
|      | Ángulo de acero ASTM A36             | 20 x 20 x 2       | 4                 |
| 4    | Tablero MDF                          | 2430 x 2040 x 9   | 1                 |
| 5    | Tablero triplex                      | 60 x 60 x 9       | 1                 |
| 6    | Tablero de poliestireno expandido    | 2000 x 1000 x 50  | 3                 |
| 7    | Tablero de poliestireno expandido    | 2000 x 1000 x 10  | 3                 |
|      |                                      |                   | <b>Continúa →</b> |

|    |                                  |            |           |
|----|----------------------------------|------------|-----------|
| 8  | Espuma de poliuretano            | -          | 1         |
| 9  | Pintura anticorrosiva negro mate | -          | 2 litros  |
| 10 | Pintura anticorrosiva gris mate  | -          | 2 litros  |
| 11 | Thinner                          | -          | 1/2 galón |
| 12 | Perno de anclaje                 | 3/8"       | 16        |
| 13 | Electrodo celuloso E6011         | 3/16"      | 1/2 kg    |
| 14 | Silicona refractaria             | -          | 1         |
| 15 | Remaches de 3/16" x 1/2"         | -          | 25        |
| 16 | Rodela plana 3/16"               | -          | 25        |
| 17 | Perno autoperforante             | 6-20x1/2"  | 80        |
| 18 | Perno autoperforante             | 8-18 x3/4" | 15        |

**Tabla 26.**

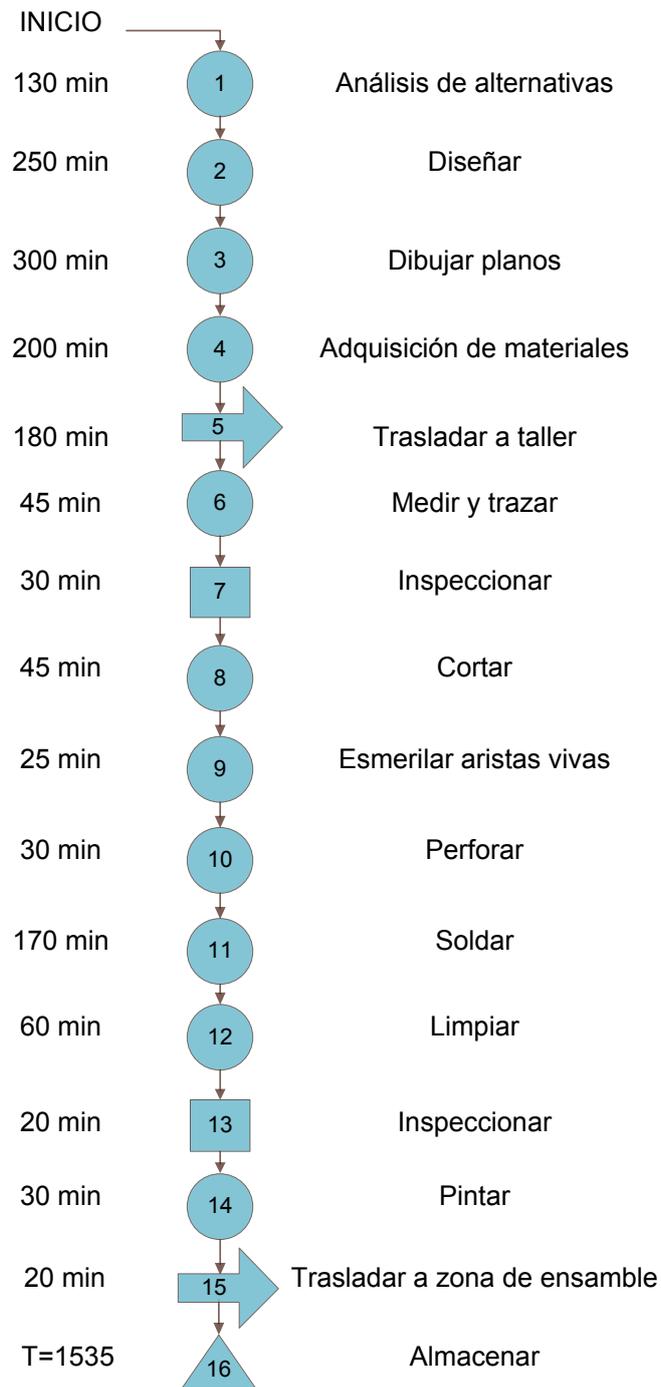
**Herramienta e instrumentos de medición**

| Item | Herramienta                 |
|------|-----------------------------|
| 1    | Cizalla de vaivén           |
| 2    | Esmeril                     |
| 3    | Máquina de soldar           |
| 4    | Amoladora                   |
| 5    | Compresor                   |
| 6    | Dobladora de chapa metálica |
| 7    | Taladro de banco            |
| 8    | Baroladora de láminas       |
| 9    | Punzón                      |
| 10   | Martillo                    |
| 11   | Flexómetro                  |
| 12   | Calibrador                  |
| 13   | Escuadra                    |
| 14   | Nivel                       |
| 15   | Grata                       |
| 16   | Cepillo de acero            |
| 17   | Cizalla                     |
| 18   | Remachadora                 |
| 19   | Pistola de silicona         |

La figura 52 muestra el diagrama de flujo para la fabricación de la estructura de la cámara de secado, la misma que está formada por tubos cuadrados de 25x25x2 mm de acero ASTM A36, los mismos que se encuentran unidos mediante juntas soldadas mediante un proceso de soldadura SMAW. Los planos de detalle de la estructura de la cámara de secado y de las demás componentes que conforman la cámara de secado se los encuentran en el Anexo A, además las hojas de proceso y los diagrama de flujo de las bandejas, chimenea y el recubrimiento interior y exterior de la cámara se los pueden encontrar en el Anexo L.



**Figura 51. Cámara de secado**



**Figura 52. Diagrama de proceso para la fabricación de la estructura de la cámara de secado**

### 4.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO

El sistema de secado fue instalado siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo M, de acuerdo a las medidas que se encuentran en el plano 2 (SSD-41P), la figura 53 muestran al sistema ya instalado y funcionando.



**Figura 53. Sistema de secado instalado**

### 4.4 INSTRUMENTACIÓN

A fin de comprobar el desempeño del sistema de secado, es necesaria la toma de datos de diferentes variables y parámetros que se ven involucradas en el proceso. Las principales variables que permiten evaluar al sistema de secado son:

- Temperatura
- Humedad
- Velocidad del aire
- Masa del producto

**Temperatura:** La temperatura es una de las variables que influyen en mayor medida en el proceso de secado, debido a esto se utiliza un sensor de temperatura LM35, en donde su comportamiento es lineal, es decir para un determinado valor de temperatura, tiene una salida de voltaje equivalente



punto del sistema, para este efecto se utiliza un anemómetro digital. La tabla 29 indica las características del anemómetro modelo CR2032.

**Tabla 29.**

**Características del anemómetro**

| Características del CR2032  |             |
|-----------------------------|-------------|
| Rango de medición           | 0 a 30 m/s  |
| Rango de temperatura        | -10 a 45 °C |
| Resolución                  | 0.1 m/s     |
| Precisión                   | ±5 %        |
| Humedad máxima de operación | ±90 %       |
| Voltaje de alimentación     | 5 VDC       |



Fuente: (OLX, 2015)

**Masa del producto:** Puesto que uno de los parámetros que permiten comparar este prototipo de secador, con otros sistemas es mediante la obtención de la curva de secado y de la humedad final del producto, para lo cual se utiliza el método gravimétrico indirecto por desecación (García & Fernández). Se emplea una balanza digital cuyas características principales se encuentran en la tabla 30.

**Tabla 30.**

**Características de la balanza digital**

| Características de la balanza digital |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Rango de medición                     | 0.01 a 300 g   |
| Resolución                            | 0.01 g         |
| Temperatura de operación              | 10 a 30 °C     |
| Precisión                             | ±0.02 g        |
| Voltaje de alimentación               | 2 baterías AAA |



Fuente : (OLX, 2015)

**Radiación solar:** Es necesario conocer la radiación global incidente que está captando el colector solar, para esto se utiliza un piranómetro analógico de marca SENSOVANT, en la tabla 31 se presentan las características más importantes de este equipo.

**Tabla 31.**  
**Características del piranómetro**

| Características del piranómetro |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| Rango de medición               | 0 a 1200 W/m <sup>2</sup> |
| Temperatura de operación        | -40 a 80 °C               |
| Sensibilidad nominal            | 68.9 mV/ W/m <sup>2</sup> |
| Salida                          | 0-100 mV                  |



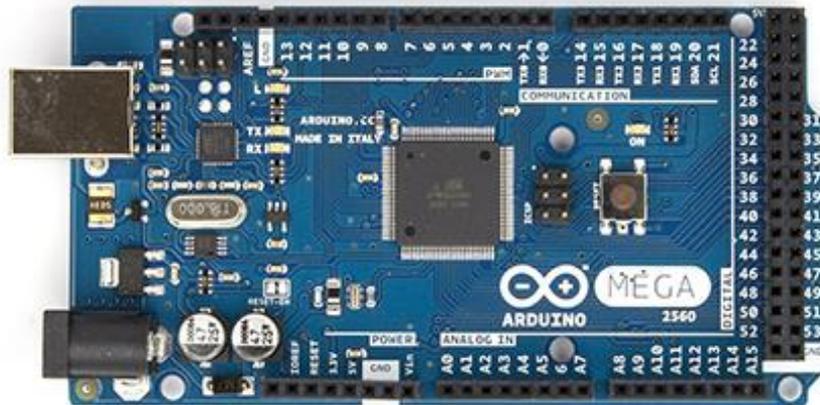
Fuente : (Sensovant, 2015)

Los valores de radiación global son medidos y almacenados en un multímetro marca radioshack modelo RMS real-220087, el cual cuenta con un software que adquiere y grafica los datos en tiempo real.

## 4.5 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos es una herramienta que permite la obtención y procesamiento de las medidas de las diferentes variables físicas consideradas anteriormente, para este proyecto se utiliza una tarjeta ARDUINO, modelo MEGA 2560, se usa este microcontralador debido a su bajo costo, fácil operación y su versatilidad (Arduino, 2015). Se realiza un algoritmo utilizando el lenguaje de programación de ARDUINO, se considera los siguientes aspectos:

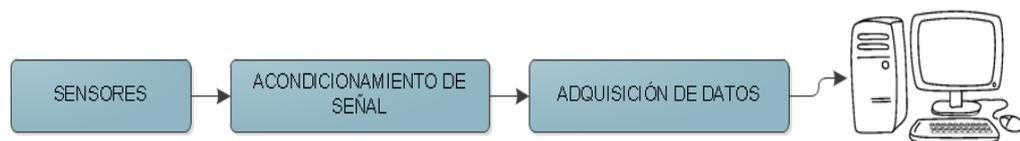
- Tipos de sensores
- Rango de toma de datos
- Almacenamiento de datos en una tarjeta micro sd
- Visualización de mediciones en una pantalla LCD



**Figura 54. Tarjeta ARDUINO MEGA**

Fuente: (Arduino, 2015)

La adquisición de datos comprende fundamentalmente de tres etapas, lectura de la señal analógica o digital que envían los sensores, el microcontrolador acondiciona la señal y posterior a ello se da la adquisición de datos en donde se convierten estas señales en un lenguaje binario el cual es entendido por el microprocesador de la tarjeta.



**Figura 55. Representación de la operación de adquisición de datos**

El programa para la adquisición de datos se lo encuentra en el Anexo K.

Los datos adquiridos en DAQ (Arduino), son guardados y almacenados en una tarjeta micro SD en formato txt, con un intervalo de medición de 3 minutos, además los valores son visualizados tanto en la pantalla del computador, como en una pantalla LCD de 16x2.

## **4.6 PRUEBAS Y RECOPIACIÓN DE DATOS**

Es importante evaluar el comportamiento térmico del sistema de secado mediante pruebas de operación, las cuales permiten analizar la influencia de las variables y parámetros que intervienen en el proceso de secado, por lo que es necesario elaborar un protocolo de pruebas, que será descrito en este capítulo.

### **4.6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS**

Para determinar el protocolo de pruebas más adecuado es necesario conocer el funcionamiento del prototipo de secador solar, que se va a evaluar el cual está conformado por un colector solar y su cámara de secado. El colector tiene como función básica captar la energía solar y almacenarla en un medio capacitivo, consiguiendo así calentar e inducir un movimiento por convección natural en el aire, es decir se reduce su humedad relativa mejorando así sus propiedades desecantes, este circulará por la cámara de secado y estará en contacto con el producto que se desea secar, provocando así una disminución de la humedad del alimento, saliendo el aire por la chimenea a una menor temperatura y una mayor humedad relativa. El tiempo de diseño estimado para llegar a la humedad final del producto es aproximadamente de 33 horas, esperando.

El correcto funcionamiento del sistema de secado será evaluado con la ayuda de formatos que contienen las mediciones de las variables que influyen en la eficiencia del secador, los cuales se encuentran en el Anexo O.

#### **4.6.1.1 METODOLOGÍA DE PRUEBAS**

La metodología de pruebas consiste en detallar las operaciones que se deben realizar para la toma de datos, así mismo se establece la ubicación de los sensores para la medición. A continuación se indican las consideraciones y especificaciones para la fase de pruebas, la misma que está dividida en dos pruebas fundamentales las cuales son:

- Prueba en vacío

- Prueba con carga

**Prueba en vacío del prototipo del sistema de secado:** Se debe realizar una prueba en vacío, es decir sin el producto que se va a secar, esto se lo hace para conocer el comportamiento del sistema durante el calentamiento del aire, sin que el mismo tenga que retirar humedad de ningún sólido, esto proporcionará datos importantes para el análisis del comportamiento térmico del aire.

La prueba en vacío tiene una duración no mayor a un día, con un intervalo de medición de 3 minutos, tiempo suficiente para la toma de datos, esta prueba será registrada tanto en el sistema de adquisición de datos como en los formatos de prueba los cuales se encuentran en el Anexo O.

**Prueba con carga de ají:** Está prueba tiene como objetivo la recopilación de datos que permitan el análisis del comportamiento térmico del sistema, cuando está presente el sólido a secar (ají), lo cual involucra un cambio, en la humedad y temperatura del fluido de trabajo en este caso del aire. A continuación se indican las condiciones de la muestra y los intervalos de medición.

#### **4.6.1.2 INTERVALO DE MEDICIÓN**

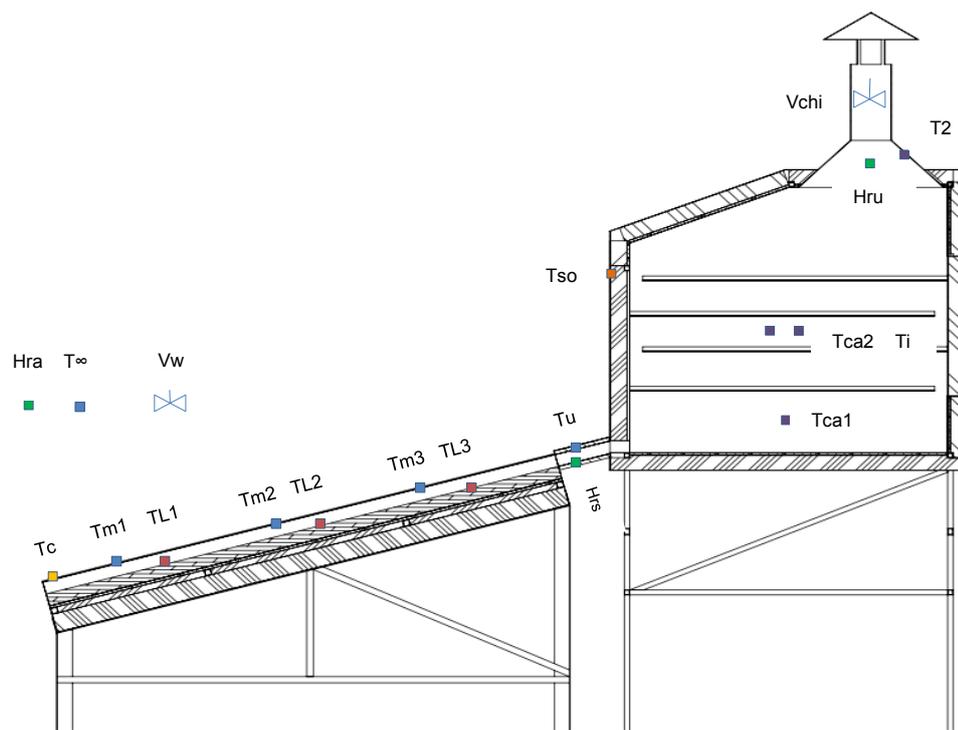
Como se señaló anteriormente las variables que influyen en el proceso de secado son temperaturas, humedades y velocidad del aire, para obtener una visión más clara de los fenómenos que ocurren dentro del sistema es recomendable tener una cantidad de datos, cuyos intervalos de medición sean cortos, proporcionando así una menor dispersión de los mismos. Como la finalidad de las pruebas es conocer el comportamiento térmico del sistema se escoge un intervalo de tiempo de 3 minutos, el cual será registrado mediante el sistema de adquisición de datos, propuesto en el sub capítulo 4.4.

Es importante mencionar que la DAQ (Adquisición de datos), es una herramienta que permite almacenar y procesar una cantidad de datos considerables al mismo tiempo, lo cual no ocurriría si las mediciones fueran

tomadas y procesadas por una persona, sin embargo para comparar los datos registrados por la DAQ en la tarjeta de memoria micro sd, se llevará un registro manual en los formularios de pruebas los cuales se encuentran en el Anexo O.

#### 4.6.1.3 UBICACIÓN DE LOS SENSORES

Los instrumentos que se utilizan para tomar las medidas de las variables requeridas deben ser instaladas adecuadamente, en la figura 56 se muestra un esquema de la ubicación de cada uno de los sensores empleados para la toma de datos y su posterior adquisición.



**Figura 56. Esquema de la ubicación de los sensores en el sistema de secado**

#### 4.6.1.4 PREPARACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO

Se lo realiza de acuerdo al manual de operación detallado en el Anexo L.

#### **4.6.1.5 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE AJÍ**

El ají (*Capsicum annum*), debe ser cortado de forma transversal en rodajas que tengan un espesor igual a 10 mm, eliminando el pedúnculo y el ápice (fin de la flor), debido a que estas partes del ají no pueden ser procesados ya que por sus características el aire no fluye por ellas, se debe repetir esta operación hasta llegar a la capacidad máxima del secador. Para observar la variación de humedad durante el proceso de secado se debe retirar 87 g de ají cada hora, los cuales se toman de forma aleatoria de las cuatro bandejas. Además la capacidad aproximada por cada bandeja es de 6.3 kg.

Se utiliza el mismo procedimiento descrito en el Anexo B, para la determinación de la curva de secado, tomando en cuenta que el peso de la muestra es de 87 g.

#### **4.6.2 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN**

Se analiza por separado el sistema de secado para así obtener una información más detallada del comportamiento de cada uno de los componentes del mismo, debido a que algunas variables están presentes tanto en el colector como en la cámara de secado, los subsistemas a analizar son los siguientes:

- Colector-almacenador
- Cámara de secado

Las variables cuantificables que influyen en todo el sistema de secado se describen a continuación.

##### **4.6.2.1 VARIABLES DEL COLECTOR-ALMACENADOR**

Los secadores solares de tipo indirecto utilizan para el calentamiento del aire colectores solares siendo necesario medir ciertas variables que permiten evaluar el desempeño térmico del secador. Las variables que influyen en el desempeño del colector son:

- Temperatura ambiente

- Temperatura media del aire dentro del colector
- Temperatura del lecho de rocas
- Temperatura de la cubierta
- Temperatura a la salida del colector
- Humedad relativa del aire al ingreso del colector
- Humedad relativa del aire a la salida del colector
- Caudal másico
- Radiación global incidente
- Densidad del aire

Es importante mencionar que la densidad del aire dentro del colector se determina utilizando las ecuaciones 110 y 111.

#### **4.6.2.2 VARIABLES DE LA CÁMARA DE SECADO**

El análisis del correcto funcionamiento del secado depende básicamente de la determinación de la curva de variación de humedad en relación al tiempo, así mismo el comportamiento del aire dentro de la cámara de secado permite establecer la eficiencia del proceso. Las variables que proporcionan esta información se detallan a continuación:

- Temperatura al ingreso de la cámara de secado
- Temperatura del lecho de ají
- Temperatura media del aire dentro de la cámara de secado
- Temperatura a la salida de la cámara de secado
- Temperatura en el recubrimiento exterior de la cámara de secado
- Humedad relativa del aire al interior de la cámara de secado
- Humedad relativa del aire a la entrada de la cámara de secado
- Humedad relativa del aire a la salida de la cámara de secado
- Variación de la masa de ají
- Tiempo
- Caudal másico a la salida de la cámara de secado

El caudal másico que circula por el sistema de secado es el mismo en cualquier punto del sistema, tomando como criterio la ley de la conservación de la masa, por este motivo puede ser medida la velocidad que ingresa en el colector o a la salida de la chimenea en la cámara de secado.

#### 4.6.3 RESULTADOS

De las pruebas realizadas en vacío y con carga de ají se obtuvieron los siguientes resultados, los mismos que se pueden apreciar en las tablas 32 a la 41.

**Tabla 32.**

#### **Resultados de la prueba de vacío del sistema de secado 07/07/2015**

| Temperaturas y humedades del sistema de secado |              |       |           |       |       |       |       |       |       |       |
|--|--------------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tiem   | $T_{\infty}$ | $T_m$ | $T_{cam}$ | $T_L$ | $T_i$ | Hra   | Hrs   | Hru   | Tu    | T2    |
| (h)  | (°C)         | (°C)  | (°C)      | (°C)  | (°C)  | (%)   | (%)   | (%)   | (°C)  | (°C)  |
| 8  | 12.88        | 10.66 | 11.15     | 15.00 | 10.96 | 94.67 | 80.80 | 80.08 | 14.80 | 11.47 |
| 9  | 18.87        | 22.46 | 15.00     | 26.37 | 15.13 | 74.53 | 58.45 | 74.40 | 24.70 | 14.90 |
| 10   | 22.64        | 28.06 | 23.94     | 39.44 | 23.80 | 60.15 | 34.40 | 43.83 | 33.55 | 22.90 |
| 11   | 22.58        | 30.96 | 30.40     | 44.08 | 29.65 | 47.65 | 29.55 | 34.35 | 33.15 | 28.50 |
| 12   | 23.43        | 27.88 | 30.09     | 40.45 | 29.71 | 54.35 | 30.85 | 34.00 | 29.80 | 29.00 |
| 13   | 22.54        | 28.87 | 30.35     | 42.05 | 29.95 | 55.72 | 30.85 | 34.47 | 30.20 | 28.90 |
| 14   | 22.60        | 27.88 | 30.18     | 41.75 | 29.84 | 59.71 | 31.40 | 35.37 | 29.95 | 28.45 |
| 15   | 20.54        | 25.53 | 27.79     | 37.69 | 27.42 | 78.32 | 33.15 | 38.85 | 26.70 | 26.45 |
| 16   | 19.91        | 24.54 | 25.92     | 35.96 | 25.59 | 84.00 | 34.65 | 41.15 | 25.35 | 25.00 |
| 17   | 17.45        | 22.31 | 24.13     | 31.01 | 23.88 | 91.31 | 36.10 | 42.35 | 22.45 | 23.40 |
| 18   | 15.19        | 19.75 | 21.65     | 26.88 | 21.39 | 95.00 | 37.65 | 43.82 | 20.20 | 21.25 |
| 19   | 14.38        | 18.68 | 20.29     | 25.12 | 20.06 | 95.00 | 38.00 | 45.00 | 19.00 | 20.00 |

**Tabla 33.**

#### **Radiación y velocidad en el interior del sistema de secado 07/07/2015**

| Radiación y velocidad en la prueba de vacío |     |                     |
|---|-----|---------------------|
| Tiemp                                       | Vw  | I                   |
| (h)   | m/s | (W/m <sup>2</sup> ) |
| 8   | 0.1 | 78.46               |
| 9   | 0.3 | 182.59              |
| 10  | 0.4 | 602.88              |
| 11  | 0.6 | 584.67              |

Continua →

|    |     |        |
|----|-----|--------|
| 12 | 0.6 | 219.20 |
| 13 | 0.6 | 275.60 |
| 14 | 0.6 | 280.93 |
| 15 | 0.6 | 104.14 |
| 16 | 0.5 | 68.90  |
| 17 | 0.4 | 86.13  |
| 18 | 0.3 | 75.79  |
| 19 | 0.3 | 0.00   |

Tabla 34.

## Resultados de la prueba de vacío del sistema de secado 13/07/2015

## Temperaturas y humedades del sistema de secado

| Tiemp<br>(h) | T <sub>∞</sub><br>(°C) | T <sub>m</sub><br>(°C) | T <sub>cam</sub><br>(°C) | T <sub>L</sub><br>(°C) | T <sub>i</sub><br>(°C) | H <sub>ra</sub><br>(%) | H <sub>rs</sub><br>(%) | H <sub>ru</sub><br>(%) | T <sub>u</sub><br>(°C) | T <sub>2</sub><br>(°C) |
|--------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 8            | 17.48                  | 21.78                  | 21.97                    | 30.21                  | 21.99                  | 43.55                  | 34.70                  | 40.44                  | 25.05                  | 19.10                  |
| 9            | 19.82                  | 28.95                  | 30.50                    | 41.15                  | 30.34                  | 36.53                  | 30.05                  | 32.60                  | 30.35                  | 28.40                  |
| 10           | 19.86                  | 29.00                  | 31.89                    | 40.57                  | 31.74                  | 35.90                  | 29.75                  | 31.21                  | 30.95                  | 29.40                  |
| 11           | 20.09                  | 31.54                  | 34.00                    | 45.08                  | 33.79                  | 32.55                  | 27.90                  | 29.95                  | 33.60                  | 31.20                  |
| 12           | 21.42                  | 33.59                  | 36.58                    | 49.08                  | 36.40                  | 31.25                  | 26.80                  | 28.65                  | 35.80                  | 34.00                  |
| 13           | 21.82                  | 29.30                  | 32.35                    | 42.95                  | 32.19                  | 34.72                  | 29.10                  | 31.23                  | 32.91                  | 29.99                  |
| 14           | 21.31                  | 30.04                  | 33.06                    | 41.75                  | 32.92                  | 31.05                  | 28.35                  | 30.40                  | 31.65                  | 30.45                  |
| 15           | 20.57                  | 27.71                  | 31.59                    | 36.60                  | 31.40                  | 34.53                  | 29.85                  | 31.35                  | 28.25                  | 29.40                  |
| 16           | 18.71                  | 21.69                  | 26.07                    | 29.10                  | 25.92                  | 48.42                  | 33.25                  | 35.53                  | 23.00                  | 24.30                  |
| 17           | 14.28                  | 19.12                  | 21.30                    | 25.68                  | 21.24                  | 68.00                  | 36.05                  | 40.12                  | 19.35                  | 20.55                  |
| 18           | 12.79                  | 18.06                  | 19.89                    | 25.04                  | 19.79                  | 81.83                  | 36.78                  | 41.56                  | 19.33                  | 19.04                  |
| 19           | 11.45                  | 18.63                  | 19.00                    | 24.97                  | 18.88                  | 82.00                  | 35.45                  | 41.00                  | 18.68                  | 17.55                  |

Tabla 35.

## Radiación y velocidad en el interior del sistema de secado 13/07/2015

## Radiación y velocidad en la prueba de vacío

| Tiemp<br>(h) | V <sub>w</sub><br>m/s | I<br>(W/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
| 8            | 0.3                   | 452.17                   |
| 9            | 0.7                   | 620.44                   |
| 10           | 0.7                   | 659.60                   |
| 11           | 0.7                   | 730.00                   |
| 12           | 0.8                   | 579.39                   |
| 13           | 0.7                   | 432.35                   |
| 14           | 0.7                   | 613.21                   |

Continua →

|    |     |        |
|----|-----|--------|
| 15 | 0.7 | 372.81 |
| 16 | 0.5 | 113.00 |
| 17 | 0.3 | 54.20  |
| 18 | 0.2 | 12.80  |
| 19 | 0.2 | 0.00   |

Tabla 36.

## Resultados de la primera prueba con carga al sistema de secado

| 08/07/2015 |            |                |                  |       |                |       |       |       |                |                |
|------------|------------|----------------|------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| Tiempo     | T $\infty$ | T <sub>m</sub> | T <sub>cam</sub> | TL    | T <sub>i</sub> | Hra   | Hrs   | Hru   | T <sub>u</sub> | T <sub>2</sub> |
| (h)        | (°C)       | (°C)           | (°C)             | (°C)  | (°C)           | (%)   | (%)   | (%)   | (°C)           | (°C)           |
| 7          | 13.76      | 15.62          | 13.07            | 16.49 | 12.92          | 95.00 | 88.10 | 94.80 | 16.50          | 12.60          |
| 8          | 18.44      | 24.99          | 17.34            | 27.22 | 16.85          | 81.70 | 62.45 | 80.11 | 25.50          | 16.50          |
| 9          | 20.68      | 34.30          | 22.09            | 40.10 | 18.64          | 59.58 | 35.00 | 68.31 | 34.35          | 20.50          |
| 10         | 21.58      | 43.92          | 25.82            | 52.94 | 19.74          | 47.00 | 28.30 | 60.95 | 44.30          | 23.05          |
| 11         | 21.42      | 39.63          | 28.36            | 52.97 | 20.77          | 37.50 | 26.40 | 46.60 | 40.40          | 25.55          |
| 12         | 22.87      | 35.67          | 27.61            | 48.99 | 20.35          | 37.16 | 27.06 | 43.89 | 36.74          | 25.14          |
| 13         | 22.27      | 28.05          | 24.87            | 39.55 | 19.24          | 41.95 | 29.90 | 41.90 | 28.95          | 23.15          |
| 14         | 21.93      | 27.52          | 24.29            | 37.28 | 19.19          | 45.00 | 30.95 | 43.60 | 27.90          | 22.60          |
| 15         | 21.08      | 24.36          | 22.57            | 32.41 | 18.41          | 46.72 | 32.15 | 43.58 | 25.20          | 21.65          |
| 16         | 19.92      | 22.20          | 19.92            | 28.35 | 16.35          | 46.85 | 33.55 | 43.65 | 22.40          | 19.25          |
| 17         | 16.57      | 22.88          | 18.84            | 28.11 | 16.66          | 59.68 | 34.90 | 61.45 | 21.09          | 17.65          |
| 18         | 13.50      | 19.11          | 17.96            | 24.27 | 16.98          | 80.00 | 37.55 | 77.88 | 19.75          | 16.35          |
| 19         | 11.35      | 16.03          | 15.98            | 20.79 | 15.71          | 84.55 | 39.10 | 94.70 | 16.35          | 14.85          |
| 20         | 9.86       | 13.71          | 13.97            | 17.82 | 14.03          | 85.80 | 41.00 | 95.00 | 14.20          | 13.65          |
| 09/07/2015 |            |                |                  |       |                |       |       |       |                |                |
| 7          | 11.34      | 11.49          | 11.08            | 12.07 | 11.76          | 92.84 | 76.89 | 95.00 | 12.26          | 9.53           |
| 8          | 19.79      | 20.40          | 15.36            | 22.38 | 12.80          | 57.89 | 47.40 | 87.70 | 21.30          | 14.60          |
| 9          | 20.45      | 27.54          | 21.02            | 33.14 | 16.29          | 46.15 | 34.25 | 58.16 | 27.82          | 20.20          |
| 10         | 20.57      | 33.36          | 25.46            | 43.11 | 19.41          | 38.72 | 29.75 | 43.68 | 33.65          | 24.25          |
| 11         | 21.26      | 31.48          | 26.52            | 42.43 | 20.71          | 36.80 | 29.05 | 39.25 | 31.74          | 25.20          |
| 12         | 21.96      | 33.88          | 26.36            | 45.92 | 20.83          | 34.10 | 27.85 | 41.45 | 34.20          | 24.15          |
| 13         | 21.24      | 30.50          | 24.21            | 41.16 | 18.34          | 35.30 | 28.85 | 46.65 | 30.92          | 21.80          |
| 14         | 21.57      | 28.40          | 23.26            | 38.07 | 18.07          | 36.60 | 29.85 | 46.33 | 28.70          | 21.35          |
| 15         | 20.81      | 26.05          | 21.74            | 34.71 | 16.97          | 35.40 | 31.20 | 46.54 | 26.35          | 20.20          |
| 16         | 20.26      | 22.93          | 19.91            | 29.99 | 15.55          | 35.11 | 32.30 | 45.90 | 23.55          | 18.85          |
| 17         | 16.40      | 21.70          | 19.03            | 27.73 | 16.87          | 59.15 | 35.20 | 61.50 | 22.06          | 18.00          |
| 18         | 14.21      | 20.10          | 18.23            | 25.36 | 17.22          | 61.45 | 36.20 | 81.00 | 20.80          | 17.10          |
| 19         | 12.45      | 17.64          | 16.39            | 22.27 | 15.82          | 62.15 | 37.45 | 92.60 | 18.00          | 15.75          |
| 20         | 10.19      | 14.99          | 14.67            | 19.26 | 14.43          | 76.65 | 39.10 | 94.75 | 15.45          | 14.45          |

Continua →

| 10/07/2015 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7          | 14.25 | 15.68 | 11.71 | 15.21 | 11.93 | 89.53 | 84.05 | 88.50 | 17.25 | 10.29 |
| 8          | 17.29 | 18.22 | 15.52 | 19.09 | 13.10 | 67.95 | 55.35 | 88.90 | 18.53 | 14.09 |
| 9          | 20.46 | 25.73 | 26.87 | 29.45 | 17.62 | 49.21 | 37.80 | 90.83 | 26.00 | 19.50 |
| 10         | 21.05 | 31.52 | 26.19 | 37.46 | 22.11 | 39.00 | 31.90 | 73.75 | 31.75 | 25.95 |
| 11         | 21.34 | 30.99 | 27.34 | 38.47 | 23.40 | 36.15 | 30.95 | 58.17 | 31.39 | 26.75 |
| 12         | 22.29 | 30.25 | 26.50 | 38.52 | 23.86 | 36.56 | 30.95 | 47.45 | 30.63 | 22.00 |
| 13         | 22.05 | 32.13 | 27.49 | 41.34 | 24.95 | 34.59 | 29.75 | 44.40 | 32.55 | 23.20 |
| 14         | 21.78 | 30.29 | 26.90 | 39.26 | 26.02 | 35.35 | 30.55 | 42.45 | 30.74 | 22.90 |
| 15         | 20.03 | 27.90 | 25.96 | 36.05 | 25.93 | 35.80 | 31.35 | 41.65 | 28.05 | 22.60 |
| 16         | 20.01 | 23.42 | 22.66 | 29.88 | 22.70 | 39.78 | 33.25 | 42.50 | 23.95 | 20.45 |
| 17         | 16.36 | 18.90 | 18.82 | 24.32 | 18.94 | 46.85 | 35.60 | 44.50 | 19.16 | 17.65 |
| 18         | 14.21 | 19.33 | 17.16 | 23.95 | 16.99 | 54.00 | 37.40 | 52.24 | 19.60 | 16.00 |
| 19         | 13.33 | 18.07 | 16.58 | 21.98 | 16.12 | 61.50 | 38.15 | 69.42 | 18.50 | 15.20 |
| 20         | 13.05 | 16.66 | 15.32 | 19.78 | 14.95 | 64.05 | 39.65 | 75.40 | 17.35 | 14.00 |
| 11/07/2015 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 7          | 13.90 | 14.61 | 12.52 | 14.87 | 12.32 | 89.20 | 69.60 | 95.00 | 15.16 | 12.20 |
| 8          | 20.09 | 21.69 | 17.27 | 24.05 | 16.43 | 59.76 | 43.45 | 82.37 | 22.15 | 13.55 |
| 9          | 20.46 | 27.79 | 22.67 | 32.47 | 20.79 | 41.00 | 33.50 | 53.47 | 28.15 | 15.85 |
| 10         | 21.02 | 29.77 | 25.04 | 37.04 | 23.08 | 36.45 | 31.40 | 40.44 | 29.95 | 23.70 |
| 11         | 21.55 | 33.94 | 27.85 | 43.33 | 22.51 | 34.47 | 29.10 | 36.47 | 34.05 | 25.70 |
| 12         | 22.03 | 29.52 | 27.71 | 40.13 | 21.48 | 35.30 | 29.45 | 36.00 | 29.83 | 25.70 |
| 13         | 22.54 | 30.23 | 27.32 | 38.71 | 22.83 | 34.90 | 29.80 | 35.56 | 30.75 | 25.45 |
| 14         | 21.82 | 27.52 | 26.05 | 33.99 | 23.51 | 37.10 | 31.05 | 35.42 | 27.94 | 25.05 |
| 15         | 20.27 | 22.95 | 23.37 | 29.94 | 21.61 | 42.70 | 33.20 | 37.95 | 23.10 | 22.45 |
| 16         | 17.02 | 19.45 | 20.33 | 25.51 | 19.59 | 65.65 | 37.20 | 46.40 | 19.64 | 19.10 |
| 17         | 15.12 | 19.41 | 18.43 | 24.05 | 18.04 | 79.10 | 39.00 | 52.00 | 19.65 | 17.50 |
| 18         | 14.71 | 18.96 | 18.12 | 22.68 | 17.60 | 86.30 | 39.60 | 62.05 | 19.00 | 16.85 |
| 19         | 13.79 | 17.18 | 17.17 | 20.44 | 16.92 | 95.00 | 41.85 | 66.63 | 17.43 | 15.60 |
| 20         | 13.72 | 17.03 | 16.84 | 19.58 | 16.62 | 95.00 | 43.00 | 68.67 | 17.20 | 15.00 |

Tabla 37.

**Resultados de radiación y velocidad dentro del sistema de secado en la primera prueba con carga**

| Fecha  | 08/07/2015 |                      | 09/07/2015 |                     | 10/07/2015 |                      | 11/07/2015 |                      |
|--------|------------|----------------------|------------|---------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|
| Tiempo | Vw         | I                    | Vw         | I                   | Vw         | I                    | Vw         | I                    |
| (h)    | m/s        | (W/ m <sup>2</sup> ) | m/s        | (W/m <sup>2</sup> ) | m/s        | (W/ m <sup>2</sup> ) | m/s        | (W/ m <sup>2</sup> ) |
| 7      | 0.1        | 330.00               | 0.1        | 338.44              | 0.1        | 249.30               | 0.2        | 13.78                |
| 8      | 0.4        | 402.00               | 0.1        | 595.07              | 0.2        | 305.34               | 0.5        | 34.45                |
| 9      | 0.4        | 581.34               | 0.4        | 751.13              | 0.5        | 665.52               | 0.6        | 41.34                |

Continua →

|    |     |        |     |        |     |        |     |       |
|----|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|-------|
| 10 | 0.5 | 731.26 | 0.5 | 759.72 | 0.6 | 383.23 | 0.6 | 41.34 |
| 11 | 0.6 | 807.16 | 0.5 | 347.95 | 0.6 | 422.99 | 0.6 | 41.34 |
| 12 | 0.5 | 533.83 | 0.5 | 492.46 | 0.6 | 352.82 | 0.5 | 34.45 |
| 13 | 0.5 | 245.34 | 0.4 | 298.91 | 0.7 | 524.77 | 0.6 | 41.34 |
| 14 | 0.5 | 213.35 | 0.4 | 202.85 | 0.8 | 357.05 | 0.6 | 41.34 |
| 15 | 0.4 | 231.33 | 0.4 | 175.81 | 0.7 | 292.14 | 0.6 | 41.34 |
| 16 | 0.3 | 55.98  | 0.3 | 97.32  | 0.6 | 93.99  | 0.5 | 34.45 |
| 17 | 0.3 | 30.72  | 0.4 | 10.81  | 0.5 | 14.66  | 0.5 | 0.00  |
| 18 | 0.4 | 0.00   | 0.5 | 0.00   | 0.5 | 0.00   | 0.5 | 0.00  |
| 19 | 0.3 | 0.00   | 0.4 | 0.00   | 0.5 | 0.00   | 0.4 | 0.00  |
| 20 | 0.3 | 0.00   | 0.3 | 0.00   | 0.3 | 0.00   | 0.4 | 0.00  |

Tabla 38.

## Resultados de la segunda prueba con carga al sistema de secado

| 14/07/2015 |            |                |                  |       |                |       |       |       |       |       |
|------------|------------|----------------|------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo     | T $\infty$ | T <sub>m</sub> | T <sub>cam</sub> | TL    | T <sub>i</sub> | Hra   | Hrs   | Hru   | Tu    | T2    |
| (h)        | (°C)       | (°C)           | (°C)             | (°C)  | (°C)           | (%)   | (%)   | (%)   | (°C)  | (°C)  |
| 8          | 17.98      | 18.68          | 15.67            | 20.05 | 14.70          | 50.39 | 39.33 | 50.11 | 19.00 | 14.06 |
| 9          | 20.70      | 26.89          | 18.50            | 29.69 | 18.01          | 41.69 | 34.44 | 44.67 | 27.00 | 18.78 |
| 10         | 21.16      | 28.55          | 21.20            | 36.34 | 18.88          | 34.94 | 31.72 | 44.83 | 28.84 | 20.33 |
| 11         | 21.99      | 28.07          | 22.26            | 36.14 | 20.15          | 34.72 | 31.00 | 42.67 | 28.33 | 21.72 |
| 12         | 22.22      | 25.10          | 20.85            | 32.26 | 19.24          | 37.11 | 32.33 | 43.06 | 25.23 | 20.22 |
| 13         | 21.44      | 23.40          | 21.04            | 29.59 | 18.11          | 38.82 | 33.00 | 44.00 | 23.52 | 18.88 |
| 14         | 21.97      | 24.18          | 19.71            | 29.94 | 18.45          | 37.00 | 33.00 | 44.22 | 24.39 | 18.78 |
| 15         | 21.32      | 22.26          | 19.06            | 27.45 | 18.15          | 35.61 | 33.72 | 43.28 | 22.69 | 19.22 |
| 16         | 18.33      | 19.12          | 16.87            | 23.36 | 16.13          | 42.47 | 35.28 | 44.47 | 19.27 | 17.06 |
| 17         | 14.21      | 17.48          | 14.49            | 21.26 | 13.90          | 47.61 | 36.22 | 47.72 | 17.78 | 15.17 |
| 18         | 12.01      | 16.75          | 14.90            | 20.34 | 13.24          | 50.67 | 37.78 | 66.22 | 18.03 | 13.33 |
| 19         | 10.63      | 14.56          | 13.83            | 18.06 | 12.03          | 54.75 | 39.00 | 73.75 | 14.69 | 12.13 |
| 15/07/2015 |            |                |                  |       |                |       |       |       |       |       |
| 8          | 16.96      | 22.32          | 14.08            | 24.10 | 13.37          | 45.71 | 43.50 | 87.88 | 22.94 | 14.61 |
| 9          | 19.23      | 23.86          | 19.20            | 29.13 | 18.37          | 40.86 | 35.00 | 54.78 | 24.44 | 17.78 |
| 10         | 20.63      | 26.54          | 22.10            | 33.77 | 21.08          | 38.35 | 32.78 | 47.13 | 26.77 | 20.39 |
| 11         | 21.69      | 31.54          | 25.62            | 40.50 | 24.50          | 34.29 | 30.33 | 44.33 | 31.87 | 22.39 |
| 12         | 21.48      | 32.46          | 27.70            | 43.61 | 27.02          | 32.83 | 28.78 | 40.18 | 32.69 | 24.67 |
| 13         | 20.84      | 28.14          | 25.54            | 38.05 | 25.49          | 37.06 | 30.53 | 40.00 | 28.82 | 23.24 |
| 14         | 20.64      | 27.96          | 25.05            | 37.88 | 25.12          | 37.24 | 31.22 | 40.61 | 28.04 | 22.72 |
| 15         | 19.78      | 31.27          | 27.40            | 42.29 | 27.71          | 31.71 | 29.78 | 38.56 | 31.78 | 25.50 |
| 16         | 19.38      | 25.10          | 24.54            | 34.83 | 25.49          | 40.00 | 31.94 | 39.44 | 25.67 | 24.00 |
| 17         | 17.69      | 20.51          | 20.28            | 28.69 | 21.63          | 56.41 | 35.06 | 44.93 | 21.06 | 20.33 |

Continua →

|                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                | 15.33 | 18.01 | 17.59 | 24.35 | 19.25 | 68.28 | 37.50 | 49.89 | 18.17 | 17.78 |
| 19                | 14.36 | 16.58 | 16.97 | 21.51 | 17.89 | 77.59 | 39.35 | 57.93 | 16.47 | 15.24 |
| 20                | 14.17 | 16.12 | 16.38 | 20.40 | 17.55 | 80.50 | 40.50 | 62.00 | 16.00 | 15.00 |
| <b>16/07/2015</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8                 | 17.82 | 25.72 | 18.12 | 27.21 | 24.10 | 68.33 | 54.89 | 89.11 | 25.89 | 14.67 |
| 9                 | 20.16 | 29.76 | 22.16 | 33.83 | 27.77 | 52.44 | 36.06 | 55.50 | 30.72 | 19.22 |
| 10                | 21.37 | 34.33 | 26.37 | 41.92 | 33.58 | 40.00 | 31.76 | 41.75 | 34.83 | 23.41 |
| 11                | 22.10 | 38.24 | 29.34 | 48.69 | 37.93 | 34.83 | 29.11 | 36.94 | 38.59 | 26.22 |
| 12                | 23.98 | 37.13 | 31.11 | 48.37 | 35.36 | 33.94 | 27.83 | 33.94 | 37.83 | 28.11 |
| 13                | 24.48 | 35.01 | 31.17 | 46.93 | 35.59 | 35.12 | 28.71 | 33.94 | 35.36 | 27.24 |
| 14                | 24.37 | 43.28 | 37.29 | 55.77 | 41.51 | 32.00 | 27.33 | 33.00 | 43.78 | 28.39 |
| 15                | 23.81 | 40.20 | 35.84 | 52.98 | 40.50 | 29.89 | 26.94 | 31.33 | 40.67 | 30.56 |
| 16                | 22.33 | 33.59 | 32.32 | 44.32 | 36.32 | 35.41 | 30.22 | 33.39 | 33.75 | 26.39 |
| 17                | 22.19 | 27.60 | 26.47 | 35.76 | 29.50 | 35.56 | 31.56 | 35.07 | 27.88 | 23.50 |
| 18                | 19.28 | 28.11 | 23.40 | 34.13 | 26.02 | 43.00 | 33.28 | 38.44 | 28.77 | 21.11 |
| 19                | 16.71 | 28.02 | 22.22 | 32.77 | 24.62 | 49.24 | 34.00 | 46.41 | 28.46 | 19.06 |
| 20                | 15.66 | 26.64 | 21.17 | 30.87 | 23.44 | 50.67 | 35.00 | 52.33 | 27.39 | 18.00 |
| <b>17/07/2015</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8                 | 16.86 | 24.34 | 17.62 | 26.23 | 18.62 | 40.59 | 36.33 | 48.76 | 24.07 | 14.00 |
| 9                 | 21.68 | 31.37 | 27.02 | 37.02 | 25.65 | 36.39 | 32.22 | 37.82 | 31.61 | 20.00 |
| 10                | 21.96 | 36.53 | 30.33 | 46.02 | 31.53 | 33.61 | 28.83 | 33.40 | 36.78 | 26.00 |
| 11                | 22.37 | 38.34 | 33.48 | 50.23 | 34.75 | 32.47 | 27.39 | 30.83 | 38.78 | 29.00 |
| 12                | 23.67 | 39.60 | 34.61 | 52.52 | 35.84 | 32.67 | 27.06 | 30.39 | 40.44 | 29.00 |
| 13                | 24.07 | 41.19 | 36.53 | 56.05 | 38.09 | 31.53 | 26.29 | 29.94 | 41.65 | 31.00 |
| 14                | 24.32 | 40.52 | 37.47 | 56.26 | 39.07 | 29.67 | 26.00 | 29.00 | 40.78 | 33.00 |
| 15                | 24.09 | 36.65 | 35.60 | 50.89 | 37.11 | 28.89 | 26.56 | 29.00 | 37.17 | 34.00 |
| 16                | 23.50 | 30.92 | 33.03 | 43.20 | 33.36 | 30.61 | 28.56 | 29.89 | 31.28 | 32.00 |
| 17                | 22.44 | 25.90 | 29.96 | 35.21 | 28.91 | 34.94 | 31.00 | 32.22 | 25.44 | 27.00 |
| 18                | 16.95 | 20.63 | 25.77 | 27.96 | 22.74 | 39.24 | 33.22 | 34.72 | 21.17 | 24.00 |
| 19                | 15.01 | 17.99 | 20.63 | 23.65 | 19.41 | 40.00 | 34.59 | 36.29 | 18.47 | 20.00 |
| 20                | 13.74 | 18.26 | 20.56 | 22.21 | 17.62 | 41.65 | 35.94 | 38.35 | 18.61 | 18.00 |

Tabla 39.

**Resultados de radiación y velocidad dentro del sistema de secado en la segunda prueba con carga**

| Fecha      | 14/07/2015 |                        | 15/07/2015 |                        | 16/07/2015 |                        | 17/07/2015 |                        |
|------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
| Tiempo (h) | Vw (m/s)   | I (W/ m <sup>2</sup> ) | Vw (m/s)   | I (W/ m <sup>2</sup> ) | Vw (m/s)   | I (W/ m <sup>2</sup> ) | Vw (m/s)   | I (W/ m <sup>2</sup> ) |
| 8          | 0.2        | 126.40                 | 0.2        | 501.75                 | 0.5        | 452.17                 | 0.3        | 509.56                 |
| 9          | 0.3        | 99.04                  | 0.2        | 488.79                 | 0.6        | 620.44                 | 0.6        | 655.18                 |

**Continúa →**

|    |     |        |     |        |     |        |     |        |
|----|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 10 | 0.4 | 180.06 | 0.3 | 444.35 | 0.7 | 659.60 | 0.7 | 788.27 |
| 11 | 0.5 | 255.96 | 0.5 | 552.92 | 0.8 | 730.00 | 0.7 | 817.79 |
| 12 | 0.6 | 258.23 | 0.7 | 492.92 | 0.7 | 579.39 | 0.7 | 601.15 |
| 13 | 0.6 | 107.54 | 0.6 | 190.34 | 0.7 | 432.35 | 0.8 | 689.00 |
| 14 | 0.6 | 75.55  | 0.6 | 247.06 | 0.8 | 613.21 | 0.8 | 636.87 |
| 15 | 0.6 | 52.19  | 0.6 | 450.20 | 0.8 | 372.81 | 0.8 | 464.27 |
| 16 | 0.5 | 36.52  | 0.6 | 104.21 | 0.7 | 113.00 | 0.7 | 121.03 |
| 17 | 0.4 | 16.94  | 0.4 | 34.67  | 0.7 | 54.20  | 0.6 | 587.01 |
| 18 | 0.3 | 0.00   | 0.3 | 0.00   | 0.6 | 12.80  | 0.5 | 0.00   |
| 19 | 0.3 | 0.00   | 0.2 | 0.00   | 0.5 | 0.00   | 0.4 | 0.00   |
| 20 | 0.3 | 0.00   | 0.2 | 0.00   | 0.4 | 0.00   | 0.3 | 0.00   |

Tabla 40.

**Resultados de variación de la masa en función del tiempo para la primera prueba con carga del sistema de secado**

**Variación de la masa en función del tiempo**

| <i>t</i><br>(h) | <i>ma</i><br>(Kg) | <i>mab1</i><br>(Kg) | <i>mab2</i><br>(Kg) | <i>mab3</i><br>(Kg) | <i>mab4</i><br>(Kg) |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0               | 99.58             | 85.58               | 99.66               | 106.49              | 84.04               |
| 1               | 95.66             | 83.15               | 95.9                | 101.36              | 81.08               |
| 2               | 79.37             | 72.03               | 86.84               | 91.6                | 70.39               |
| 3               | 72.84             | 64.35               | 79.93               | 83.36               | 62.46               |
| 4               | 65.92             | 57.42               | 69.99               | 79.01               | 56.03               |
| 5               | 63.26             | 51.52               | 68.09               | 71                  | 52.56               |
| 6               | 53.02             | 45.42               | 63.39               | 64.76               | 46.69               |
| 7               | 47.24             | 41.12               | 59.47               | 63.76               | 42.57               |
| 8               | 44.42             | 36.46               | 57.94               | 62.36               | 31.69               |
| 9               | 38.11             | 33.07               | 49.74               | 57.49               | 33.65               |
| 10              | 36.12             | 30.79               | 42.94               | 56.52               | 30.95               |
| 11              | 35.6              | 25.62               | 37.42               | 51.7                | 28.19               |
| 12              | 32.57             | 22.91               | 34.13               | 51.66               | 26.37               |
| 13              | 31.77             | 21.25               | 30.54               | 49.76               | 23.88               |
| 14              | 30.58             | 19.18               | 28.24               | 47.55               | 23.85               |
| 15              | 27.42             | 17.32               | 25.26               | 46.06               | 21.45               |
| 16              | 25.1              | 15.96               | 22.73               | 43.95               | 19.49               |
| 17              | 23.28             | 14.36               | 20.03               | 40.43               | 17.3                |
| 18              | 22.3              | 13.42               | 18.42               | 38.7                | 16.12               |
| 19              | 21.01             | 12.66               | 16.82               | 35.56               | 14.82               |
| 20              | 20.81             | 11.85               | 15.6                | 31.97               | 13.66               |
| 21              | 20.32             | 11.42               | 13.42               | 29.26               | 12.89               |

**Continúa →**

|    |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 22 | 18.27 | 11.36 | 13.27 | 26.95 | 12.66 |
| 23 | 17.35 | 11.28 | 12.81 | 20.63 | 12.42 |
| 24 | 16.37 | 11.24 | 12.73 | 18.76 | 12.4  |
| 25 | 16.02 | -     | 12.63 | 17.09 | 12.38 |
| 26 | 15.05 | -     | -     | 15.6  | -     |
| 27 | 14.81 | -     | -     | 13.73 | -     |
| 28 | 14.65 | -     | -     | 13.22 | -     |
| 29 | 14.58 | -     | -     | 13.13 | -     |
| 30 | 14.42 | -     | -     | 13.01 | -     |

Tabla 41.

**Resultados de variación de la masa en función del tiempo para la segunda prueba con carga del sistema de secado**

**Variación de la masa en función del tiempo**

| <i>t</i><br>(h) | <i>ma</i><br>(Kg) | <i>mab1</i><br>(Kg) | <i>mab2</i><br>(Kg) | <i>mab3</i><br>(Kg) | <i>mab4</i><br>(Kg) |
|-----------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0               | 87.25             | 87.07               | 86.99               | 86.99               | 87.01               |
| 1               | 84.12             | 82.6                | 80.99               | 83.36               | 85.38               |
| 2               | 71.58             | 71.98               | 69.65               | 80.93               | 81.83               |
| 3               | 71.92             | 68.52               | 66.61               | 74.94               | 71.91               |
| 4               | 69.64             | 62.5                | 61.37               | 72.44               | 67.61               |
| 5               | 67.59             | 57.43               | 56.38               | 70.47               | 63.46               |
| 6               | 66.72             | 54.05               | 52.06               | 68.85               | 60.92               |
| 7               | 65.52             | 49.74               | 48.83               | 67.27               | 57.43               |
| 8               | 63.67             | 48.61               | 47.92               | 66.24               | 56.78               |
| 9               | 60.89             | 46.65               | 46.02               | 65.53               | 55.08               |
| 10              | 57.57             | 43.48               | 42.86               | 63.92               | 52.04               |
| 11              | 55.09             | 40.67               | 40.08               | 62.52               | 49.08               |
| 12              | 50.91             | 36.97               | 36.17               | 60.05               | 45.32               |
| 13              | 46.64             | 31.94               | 31.46               | 56.89               | 40.43               |
| 14              | 45.03             | 29.33               | 29.08               | 54.96               | 37.56               |
| 15              | 43.45             | 27.32               | 27.13               | 52.86               | 35.06               |
| 16              | 40.53             | 24.91               | 24.97               | 50.64               | 32.26               |
| 17              | 39.36             | 23.05               | 23.08               | 48.35               | 30.06               |
| 18              | 40.08             | 22.26               | 22.29               | 47.22               | 29.00               |
| 19              | 40.48             | 21.57               | 22.02               | 45.54               | 28.65               |
| 20              | 37.91             | 20.6                | 20.64               | 44.54               | 27.16               |
| 21              | 34.48             | 19.23               | 19.04               | 42.85               | 25.27               |
| 22              | 30.92             | 17.52               | 17.12               | 37.91               | 22.62               |
| 23              | 28.27             | 16.55               | 16.04               | 35.64               | 21.01               |

**Continúa →**

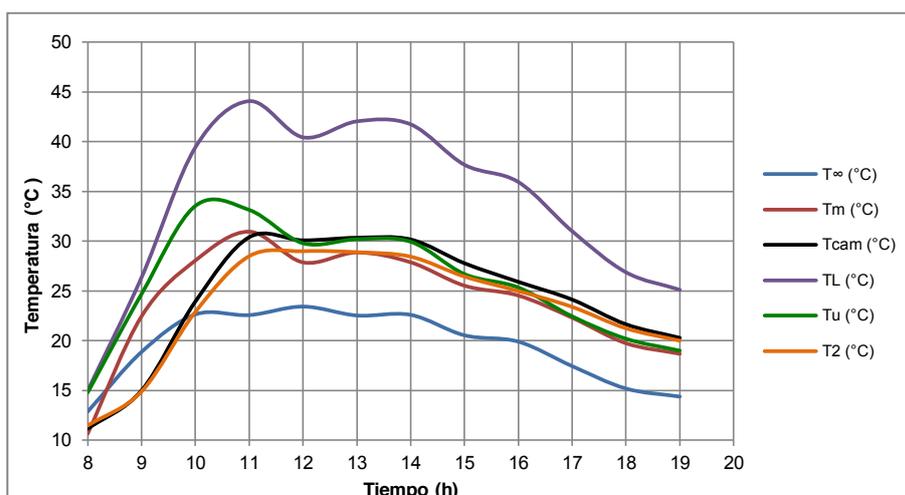
|    |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 24 | 25.05 | 15.13 | 14.9  | 32.2  | 18.6  |
| 25 | 23.52 | 14.54 | 14.09 | 30.35 | 17.51 |
| 26 | 21.82 | 13.97 | 13.46 | 28.34 | 16.41 |
| 27 | 20.37 | 13.39 | 13.16 | 26.47 | 15.34 |
| 28 | 19.69 | 13.09 | 12.93 | 26.47 | 14.66 |
| 29 | 19.5  | 12.72 | 12.91 | 24.38 | 14.32 |
| 30 | 19.89 | -     | 12.73 | 23.33 | 14.06 |
| 31 | 17.28 | -     | 12.73 | 21.62 | 13.8  |
| 32 | 15.45 | -     | -     | 20.19 | 13.16 |
| 33 | 13.38 | -     | -     | 19.2  | 12.74 |
| 34 | 13.25 | -     | -     | 17.21 | -     |
| 35 | 13.19 | -     | -     | 15.24 | -     |
| 36 | 13.13 | -     | -     | 14.21 | -     |
| 37 | 13.02 | -     | -     | 13.39 | -     |
| 38 | 12.95 | -     | -     | 13.09 | -     |
| 39 | 12.93 | -     | -     | 12.76 | -     |

## 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este subcapítulo se realizará el análisis de los resultados de las pruebas realizadas al sistema de secado y la validación del modelo matemático planteado para el calentamiento del aire. A continuación se indican el análisis de los resultados de las pruebas tanto en vacío como con carga.

### 4.7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA EN VACIO

Las pruebas en vacío fueron realizadas entre los días 7 y 13 del mes de Julio del 2015, en los cuales la radiación global promedio fue de 232.66 y 421.81 W/m<sup>2</sup> respectivamente, con una temperatura ambiente que fluctúa entre 11 y 23 °C, y con una velocidad del aire promedio dentro del sistema de 0.4 m/s, los resultados obtenidos de las pruebas, se presentan en las figuras 57 a la 61, las cuales muestran el comportamiento térmico del colector y de la cámara de secado.

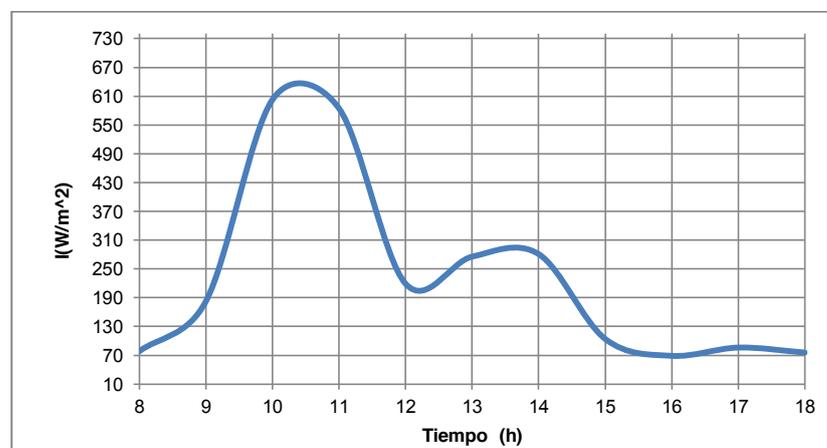


**Figura 57. Temperaturas en función del tiempo de la primera prueba en vacío del 07/07/2015**

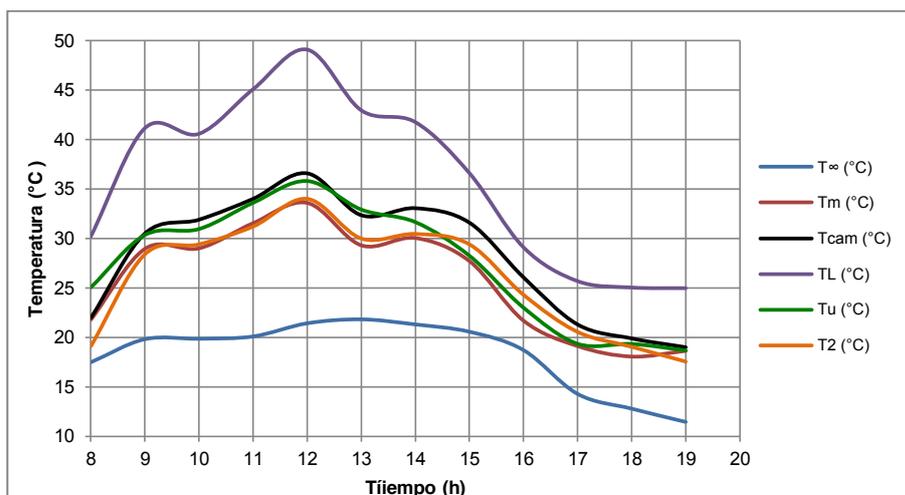
Como se observa en la figura 57, el comportamiento de las temperaturas a lo largo del periodo de funcionamiento del sistema presentan una tendencia creciente, alcanzando sus valores máximos durante las 2 primeras horas del operación y manteniendo ese comportamiento por un periodo de aproximadamente 4 horas (10 a 14 horas). Esto es producido por la incidencia solar directa en el lecho rocas que proporciona energía al aire y a su vez calienta el interior de la cámara de secado.

La temperatura que logre alcanzar el aire al cruzar la placa colectora va a depender directamente de la temperatura a la cual se encuentre el lecho, en la figura 57, se puede visualizar que este alcanza un temperatura máxima de 44 °C, lo que permite que exista un gradiente de temperatura ayudando a que el flujo de calor aumente. Como se puede notar en la gráfica de la temperatura del lecho este no presenta un descenso brusco en su temperatura, a diferencia de lo que ocurre si la placa fuera metálica, esto se da debido a que la piedra tiene la capacidad de almacenar energía, que para este caso proporciona 2 horas más de calentamiento del aire y como se ve en la figura la diferencia entre las temperaturas del aire y de la cámara de secado con relación al ambiente es de 12 °C.

En el gráfico anterior se puede observar que la temperatura del aire ( $T_m$ ), alcanza su valor máximo a las 11 horas, siendo este de alrededor de  $31^\circ\text{C}$ , a medida que el aire circula por el interior del colector este se va calentando, razón por lo cual el comportamiento de la temperatura a la salida del colector ( $T_u$ ), presenta valores mayores con relación a la temperatura promedio del aire, teniendo una diferencia de aproximadamente  $3^\circ\text{C}$ . Si analizamos el comportamiento de la temperatura del aire a la salida del colector se puede notar que a partir de llegar a su valor máximo presenta dos etapas, la primera en la cual tiene una tendencia decreciente esto se debe a que en ese periodo de tiempo la radiación solar disminuye, y la temperatura del lecho de igual forma, la segunda etapa que es notoria, cuando la temperatura del ducto llega al equilibrio con la cámara de secado, este fenómeno ocurre, ya que el interior de la cámara se calentó, en este instante no se produce ni ganancias, ni pérdidas de calor por lo que se puede decir que se llegó a un equilibrio térmico, es decir que la energía que se requería para calentar la cámara de secado es igual a la energía proporcionada por el colector solar durante las horas de mayor radiación, posterior a estas dos etapas se nota que tanto la temperatura de la cámara como la del aire comienzan a decrecer paulatinamente pero manteniendo el mismo  $\Delta T$ , lo que nos hace notar que el aire en el interior del colector sigue calentándose pese a que la radiación ha disminuido como se puede apreciar en la figura 58.



**Figura 58. Radiación global del 07/07/2015**

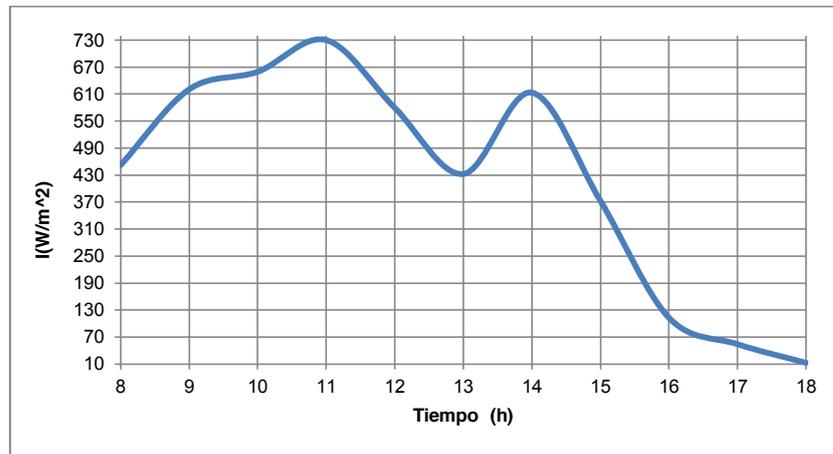


**Figura 59. Temperaturas en función del tiempo de la segunda prueba en vacío del 13/07/2015**

La figura 59, presenta un comportamiento térmico similar a la primera prueba en vacío realizada el 07/07/2015, en donde presenta algunas diferencias, la prueba fue realizada en un día en el cual se encontraba parcialmente nublado y por ello la radiación es mayor con relación a la de la primera prueba, por lo cual la temperatura máxima alcanzada en el lecho fue de aproximadamente 49 °C, así mismo la temperatura  $T_m$  y  $T_u$  alcanzada en este día fue de alrededor de 34 y 36 °C respectivamente, además se puede apreciar que tanto la temperatura a la salida del colector y la temperatura al interior de la cámara de secado llegan a un equilibrio térmico alrededor de las 11 a 14 horas, tiempo similar a la de la anterior prueba con la diferencia que la estabilización se dio, en un rango de temperaturas comprendido entre 30 y 35 °C aproximadamente.

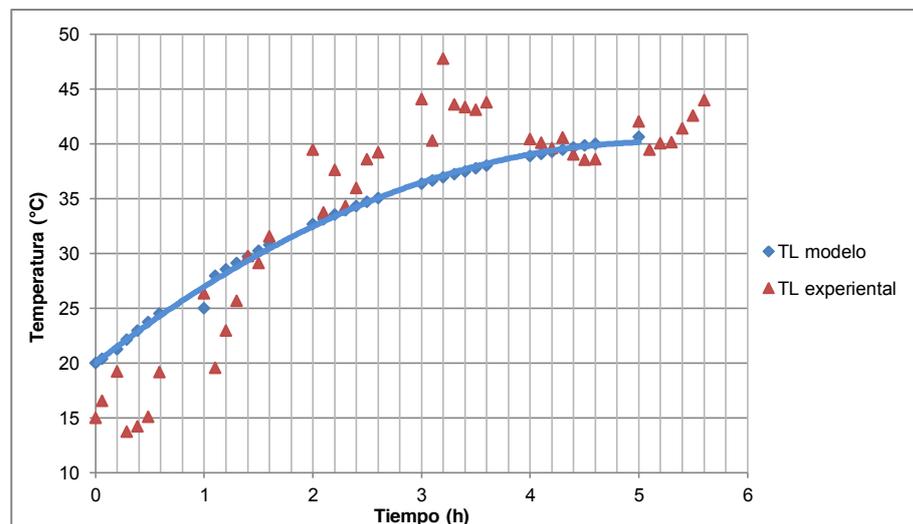
Como se puede observar en la figura 59, que a partir de las 15 horas, la temperatura en lecho tuvo un descenso considerable esto se produjo debido a que a esa hora en el sitio de pruebas hubo presencia de nubosidades e incluso una ligera llovizna, lo que provocó que la radiación disminuya como se puede apreciar en la figura 60, sin embargo la temperatura del aire dentro de la cámara y del colector no se vio afectado debido a que la energía que se logró almacenar en el lecho fue la necesaria para continuar con el

calentamiento del aire a pesar de no existir sol, lo cual proporciono que el  $\Delta T$ , existente entre el aire dentro del sistema y el ambiente se mantenga a  $14^{\circ}\text{C}$  aproximadamente similar a lo que se obtuvo en la primera prueba.



**Figura 60. Radiación global del 13/07/2015**

La figura 61 muestra una gráfica comparativa entre el modelo matemático planteado para el diseño del colector solar y los datos experimentales obtenidos.



**Figura 61. Temperatura del lecho de rocas para los datos experimentales y teóricos**

El modelo matemático planteado permite determinar la temperatura máxima que alcanza el lecho de rocas, para la validación del mismo se

reemplazó los datos obtenidos de la primera prueba realizada en vacío, de lo cual se obtuvo las gráficas que se pueden observar en la figura 61, la misma que presenta un error porcentual promedio de aproximadamente el 11%, el cual es un error de diseño aceptable. La dispersión de los datos que se observan en la gráfica se deben a que el modelo matemático planteado usa valores promedios, es decir no contempla variaciones de la radiación durante la operación y los coeficientes de transferencia de calor son calculados con las temperaturas promedios, por este motivo los datos presentan esta dispersión.

De las pruebas realizadas en vacío se obtuvo que la eficiencia del colector es de alrededor del 32.52 % cuyo flujo másico promedio es de aproximadamente 0.01 kg/s, además es importante mencionar que el gradiente de temperatura entre el ambiente y la temperatura de la salida del colector fue aproximadamente 15°C, en la tabla 42 muestra los valores promedios obtenidos para la prueba de vacío.

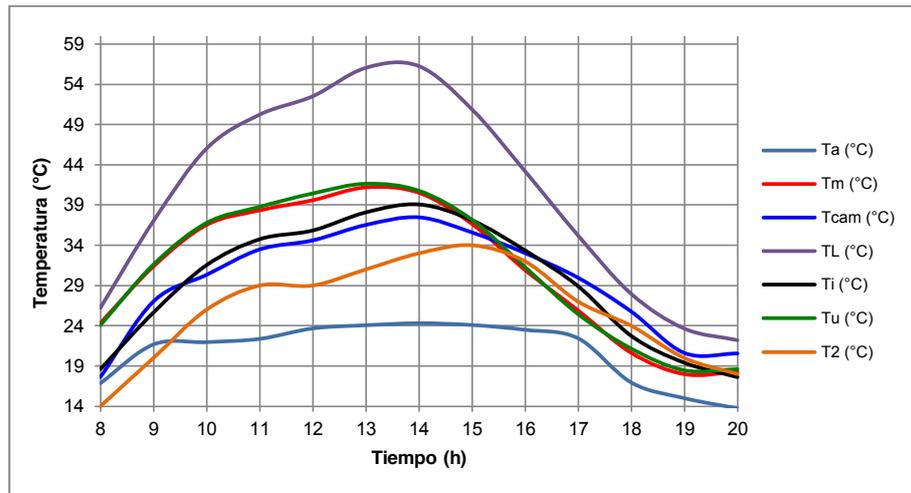
**Tabla 42.**

**Temperaturas promedio de la prueba en vacío**

| Temperaturas promedio de la prueba en vacío |            |
|---|------------|
| $T_{\infty}$                                | 18.86 (°C) |
| TL  | 36.02 (°C) |
| Tm  | 25.78 (°C) |
| Tu  | 30.41 (°C) |
| Tcam  | 28.18 (°C) |

**4.7.2 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA CON CARGA**

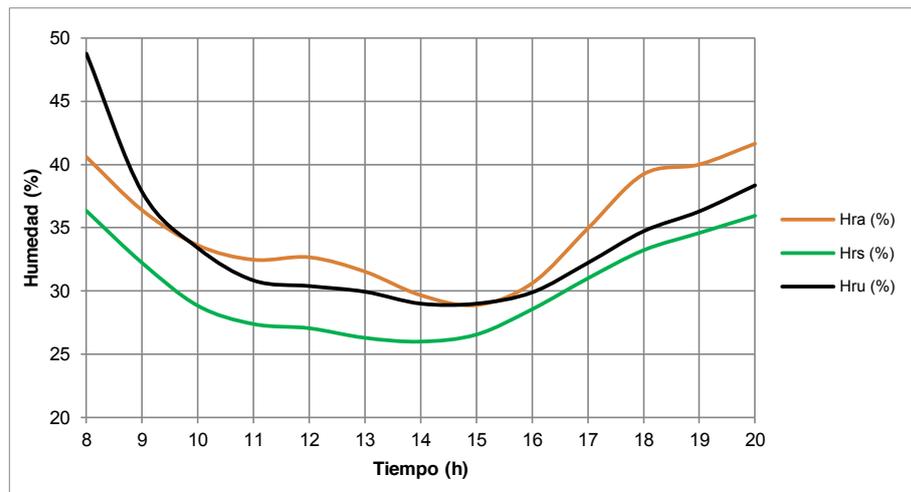
Para el análisis del comportamiento de las temperaturas dentro del sistema de secado durante las pruebas con carga de ají, se selecciona el día en que la radiación solar tuvo un comportamiento uniforme y donde se obtuvo los valores más altos de temperatura tanto en el lecho de rocas, como del aire en el interior del colector y la cámara de secado, con relación a los demás datos obtenidos durante el proceso de pruebas, los mismos que se encuentran en el Anexo P.



**Figura 62. Temperaturas en función del tiempo de la prueba con carga**

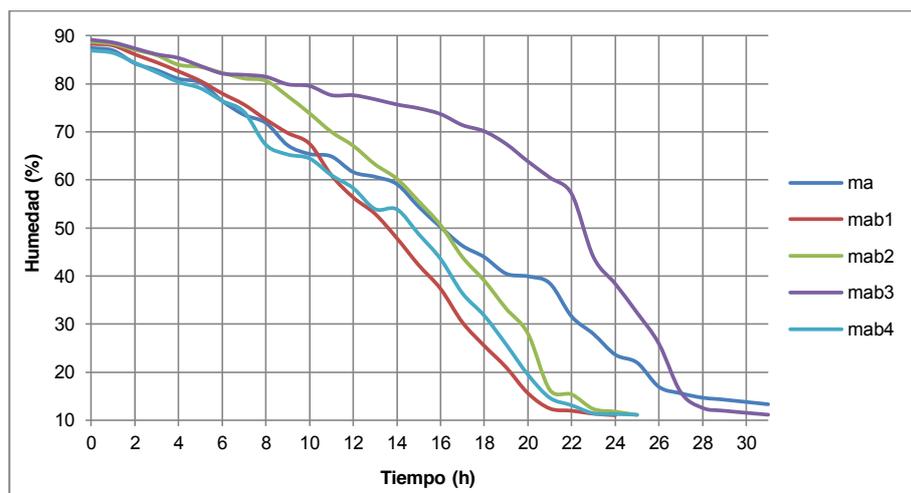
Las curvas obtenidas en la figura 62, corresponde a la prueba con carga de ají realizada el día 17 de julio del 2015, en donde la radiación global promedio fue de  $587.01 \text{ W/m}^2$ , como se puede apreciar en las gráficas estas presenta un comportamiento similar a las curvas de la prueba en vacío, sin embargo es notorio que al existir un medio que requiere una cantidad de energía mayor para llegar al equilibrio, se produzca una diferencia de temperatura entre la cámara de secado y la temperatura a la salida del colector, esto ocurre ya que en el sistema existe una transferencia de calor entre el aire que circula por el interior de la cámara y el producto a secar, el gradiente de temperatura permanece constante en un valor aproximado de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  durante la operación del secador.

A diferencia de lo que ocurre en las pruebas de vacío el  $\Delta T$  entre la temperatura a la salida del colector y la temperatura a la salida de la cámara de secado ( $T_2$ ) es considerable con relación a las obtenidas a las pruebas en vacío, esto ocurre debido a que el aire que atraviesa a la cámara de secado comienza a saturarse y a ceder parte de la energía que tiene, saliendo de la cámara de secado con una temperatura menor que la que entro, esto se puede apreciar con más claridad en la figura 63, en donde se muestra la saturación del aire al atravesar el sistema de secado.



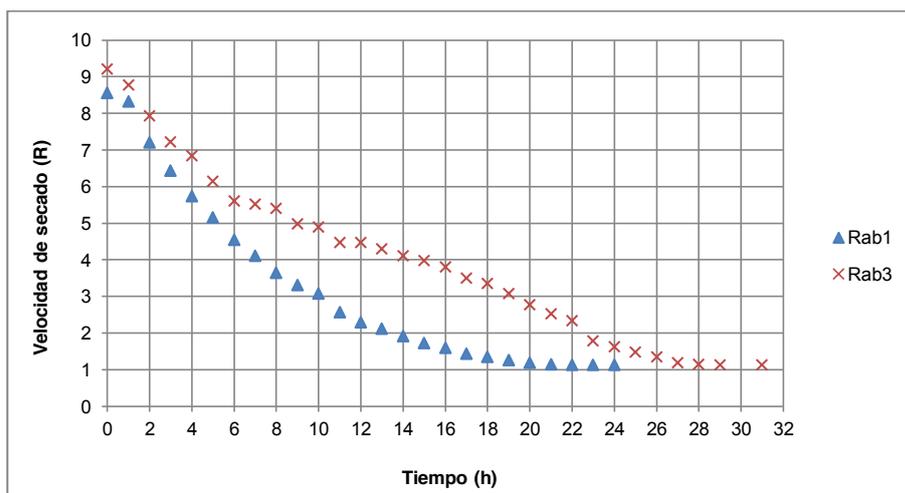
**Figura 63. Variación de la humedad del aire al atravesar el sistema de secado**

Como se observa en la figura 63, la humedad relativa del aire a la salida del colector mantiene una variación con respecto a la humedad de salida de la cámara de secado de alrededor del 3 al 5%, lo que indica que el aire que sale del sistema de secado a retirado humedad del producto seco, es decir se ha saturado, y continua por un periodo de 12 horas, gracias a que el secador tiene un sistema de almacenamiento de energía que permite prolongar su operación.



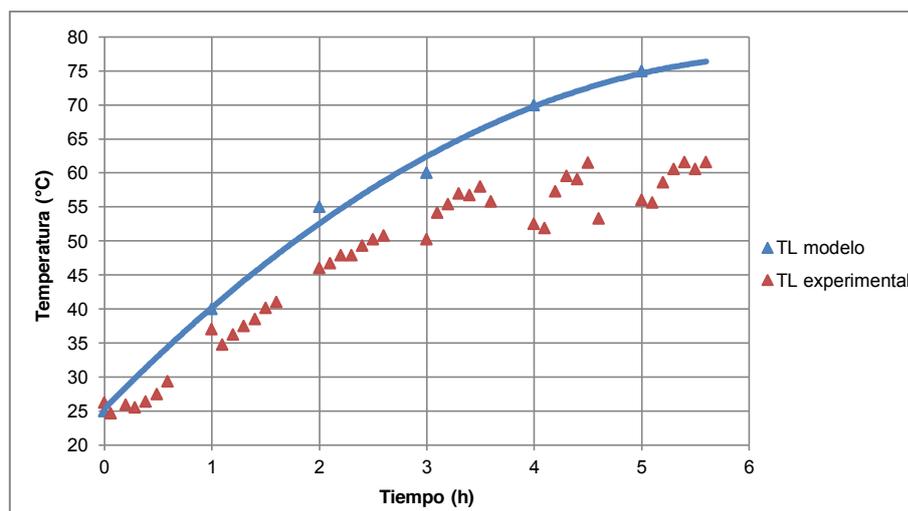
**Figura 64. Curvas de secado del ají para la prueba con carga**

En la figura 64 se presentan las curvas de humedad vs tiempo, para las cuatro bandejas, cuyo peso aproximado de cada una de ellas fue de 6 kg, con un espesor del lecho de 4.5 cm y con una humedad del ají que se encuentra entre el 86 al 88%, bajo estas condiciones, el proceso de secado tuvo una duración de aproximadamente 32 horas, llegando a alcanzar una humedad en base húmeda del 11%. Como se puede apreciar las bandejas 1, 2 y 4 presentan una disminución de su contenido de humedad con una velocidad de secado mayor, lo que involucra que el tiempo de secado disminuya, a diferencia de la tendencia que presenta la bandeja 3 y la muestra ambiente, además es visible que la muestra que se secó en el ambiente presenta un comportamiento similar a lo que ocurre en las bandejas que se encuentran en el interior de la cámara de secado, lo que nos hace pensar que la velocidad de remoción de humedad es elevada con relación a las bandeja 3 esto se debe a que el secado de la muestra que está en el ambiente es de forma directa, pero no logra alcanzar la humedad esperada (11%), ya que llega a un punto en el que la humedad que contiene el producto no puede ser retirada por que la humedad en el ambiente ya se encuentra saturada y lo que provoca es que el producto vaya ganando humedad.



**Figura 65. Comparación de la velocidad de secado de la bandeja 1 respecto a la bandeja 3**

Como se mencionó anteriormente la bandeja 3, presenta mayor dificultades para retirar agua del producto con relación a las demás, esto ocurre debido a que la velocidad de secado es baja, este fenómeno se presenta ya que la velocidad del gas desecante disminuye conforme atraviesa las bandejas 1 y 2, provocando que el coeficiente de transferencia de calor disminuya y por ende aumenta el tiempo de secado, por otro lado en la bandeja 4 por encontrarse cercana a una reducción de sección en el interior de la cámara de secado, hace que el aire al atravesar la reducción, aumenta su velocidad y disminuye la presión, ocasionando que el coeficiente de transferencia de calor por convección aumente y así disminuya el tiempo de secado.



**Figura 66. Temperatura del lecho de rocas para los datos experimentales y teóricos para la prueba con carga**

La figura 66, muestra el comportamiento térmico del lecho tanto experimental como teórico, el cual presenta un error porcentual promedio del 12%.

Si se compra el error porcentual que se obtuvo en la prueba en vacío, se aprecia que tuvo un incremento, esto se debe a que el modelo matemático planteado describe el comportamiento térmico del colector cuando este no tiene una carga térmica adicional que para este caso es el ají, razón por la cual los valores experimentales presentan esta dispersión con relación a los

teóricos, además como en las pruebas anteriores el modelo únicamente utiliza valores promedios de propiedades termofísicas y la radiación global promedio.

De la prueba con carga se obtuvo que las eficiencias del colector, de la cámara de secado y del sistema de secado, fueron del 33%, 50.33% y del 16.61%, respectivamente, las cuales fueron calculadas de acuerdo a la ecuaciones 93, 104 y 105.

**Tabla 43.**

**Temperaturas promedio de la prueba con carga**

| Temperaturas promedio de la prueba con carga |            |
|--|------------|
| $T_{\infty}$                                 | 20.82 (°C) |
| TL   | 40.57 (°C) |
| Tm   | 30.94 (°C) |
| Tu   | 31.25 (°C) |
| Tcam   | 30 (°C)    |
| T2   | 26 (°C)    |

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE COSTOS DEL SECADOR

En el presente capítulo se describe todos los costos que intervienen en el proceso constructivo y de evaluación del prototipo, es decir se realiza un análisis de los costos directos e indirectos, entre los que se encuentran el costo de materiales, herramientas, equipos de medición, mano de obra, etc.

#### 5.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son aquellos que influyen directamente en la fabricación de la cámara de secado y el colector-almacenador como son materiales directos para la construcción y mano de obra directa.

#### Costos directos para la fabricación del prototipo

Los costos directos involucrados en la construcción del prototipo de secador solar se encuentran desde la tabla 44 a la 47.

**Tabla 44.**

#### Costos directos de materiales para la fabricación del sistema de secado

| Item | Descripción  | Proveedor        | Cant | Valor unitario [USD] | Valor total [USD] |
|------|--|------------------|------|----------------------|-------------------|
| 1    | Plancha de acero ASTM A36<br>2400 x 1220 x 0.9 mm  | PROMA HIERRO     | 4    | \$18.51              | \$ 74.04          |
| 2    | Plancha galvanizada ASTM A6<br>2400 x 1220 x 0.9mm | PROMA HIERRO     | 2    | \$20.19              | \$ 40.38          |
| 3    | Plancha galvanizada ASTM A6<br>2400 x 1220 x 0.7mm | PROMA HIERRO     | 1    | \$15.22              | \$ 15.22          |
| 4    | TABLERO MDF<br>2430 x 2040 x 9 mm                  | PROVEMADERA S.A. | 1    | \$22.67              | \$ 22.67          |
| 5    | Tablero triplex<br>2400 x 1220 x 9 mm              | MEGAKYWI         | 1    | \$24.33              | \$ 24.33          |
| 6    | Tablero triplex<br>60 x 60 x 9 mm                  | MEGAKYWI         | 1    | \$ 4.22              | \$ 4.22           |

**Continúa →**

|    |  |                 |     |         |          |
|----|--|-----------------|-----|---------|----------|
| 7  | Plancha de poliestireno<br>expandido<br>2000 x 1000 x 100 mm | MEGAKYWI        | 1   | \$13.29 | \$ 13.29 |
| 8  | Plancha de poliestireno<br>expandido<br>2000 x 1000 x 50 mm  | MEGA ESPONJAS   | 4   | \$ 8.48 | \$ 33.92 |
| 9  | Plancha de poliestireno<br>expandido<br>2000 x 1000 x 10 mm  | MEGA ESPONJAS   | 4   | \$ 1.69 | \$ 6.76  |
| 10 | Espuma de poliuretano  | MUNDO DEL COLOR | 2   | \$ 7.05 | \$ 14.10 |
| 11 | Ángulo de acero ASTM A36 de<br>50 x 50 x 4 mm                | PROMA HIERRO    | 2   | \$20.26 | \$ 40.52 |
| 13 | Ángulo de acero de ASTM A36<br>20 x 20 x 2 mm                | DISMAHIERRO     | 4   | \$ 4.55 | \$ 18.20 |
| 14 | Tubo cuadrado de acero<br>ASTM A36<br>25 x 25 x 2 mm         | PROMA HIERRO    | 7   | \$ 7.72 | \$ 54.04 |
| 15 | Pintura anticorrosiva gris mate<br>1 litro                   | MUNDO DEL COLOR | 2   | \$ 3.57 | \$ 7.14  |
| 16 | Pintura anticorrosiva negro<br>mate 1 litro                  | MUNDO DEL COLOR | 4   | \$ 3.57 | \$ 14.28 |
| 17 | Thinner<br>1 galón   | MEGAKYWI        | 1   | \$ 8.82 | \$ 8.82  |
| 18 | Desoxidante<br>1 galón                                       | MUNDO DEL COLOR | 1   | \$ 7.78 | \$ 7.78  |
| 19 | Malla galvanizada tejida de<br>1/8" de 1000x900 mm           | MEGAKYWI        | 5   | \$ 4.33 | \$ 21.65 |
| 20 | Remache 3/16" x 1/2"   | MEGAKYWI        | 25  | \$ 0.03 | \$ 0.75  |
| 21 | Rodela plana 3/16"   | MEGAKYWI        | 25  | \$ 0.04 | \$ 1.00  |
| 22 | Perno autoperforante 6-<br>20x1/2"                           | MEGAKYWI        | 100 | \$ 0.21 | \$ 21.00 |
| 23 | Perno autoperforante 8-18<br>x3/4"                           | MEGAKYWI        | 15  | \$ 0.25 | \$ 3.75  |
| 24 | Electrodo celuloso E6011 de<br>3/16" 1kg                     | MEGAKYWI        | 1   | \$ 5.00 | \$ 5.00  |
| 25 | Perno de anclaje 3/8"  | MEGAKYWI        | 32  | \$ 0.40 | \$ 12.80 |
| 26 | Disco de desbaste 7" x 1/4" x<br>7/8"                        | MEGAKYWI        | 7   | \$ 3.88 | \$ 27.16 |
| 27 | Disco de desbaste 7" x 1/4" x<br>7/8"                        | MEGAKYWI        | 5   | \$ 2.99 | \$ 14.95 |
| 28 | Lija flapdisco 7" x 55/64" GR<br>#6                          | MEGAKYWI        | 1   | \$11.49 | \$ 11.49 |
| 29 | Cepillo de alambre copa 4"                                   | MEGAKYWI        | 1   | \$ 4.94 | \$ 4.94  |
| 30 | Broca HSS $\phi$ 9.4 mm                                      | MEGAKYWI        | 1   | \$ 2.57 | \$ 2.57  |

Continúa →

|  |   |                     |    |          |                  |
|--|---|---------------------|----|----------|------------------|
| 31                                     | Lija de agua GR #220                          | MEGAKYWI            | 10 | \$ 0.35  | \$ 3.50          |
| 32                                     | Lija de agua GR #1500                         | MEGAKYWI            | 7  | \$ 0.65  | \$ 4.55          |
| 33                                     | Vidrio de 4 mm                                | INDUVID             | 1  | \$ 90.00 | \$ 90.00         |
| 34                                     | Plancha de piedra volcánica<br>1000x600x50 mm | ARTESANO SAN ANDRES | 2  | \$ 50.00 | \$ 100.00        |
| <b>Subtotal [USD]</b>                  |   |                     |    |          | <b>\$ 724.82</b> |
| <b>IVA [12%]</b>                       |   |                     |    |          | <b>\$ 86.98</b>  |
| <b>Valor total de materiales [USD]</b> |   |                     |    |          | <b>\$ 811.08</b> |

Tabla 45.

### Costo de mano de obra directa para la construcción del sistema de secado

| Item  | Descripción | Unidad     | Cant | Valor diario [USD] | Días de trabajo | Valor mensual [USD] |
|---|-------------|------------|------|--------------------|-----------------|---------------------|
| 1   | Soldador    | Día/hombre | 2    | \$ 30.00           | 10              | \$ 600.00           |
| 2   | Obrero 1    | Día/hombre | 1    | \$ 20.00           | 10              | \$ 200.00           |
| 3   | Obrero 2    | Día/hombre | 1    | \$ 20.00           | 3               | \$ 60.00            |
| <b>Valor total mano de obra directa [USD]</b> |             |            |      |                    |                 | <b>\$ 860.00</b>    |

Tabla 46.

### Costo directo de diseño del prototipo de secador solar

| Item  | Descripción | Unidad | Cant | Valor mensual [USD] | Meses de trabajo | Valor total [USD]  |
|---|-------------|--------|------|---------------------|------------------|--------------------|
| 1   | Diseñador 1 | Mes    | 1    | \$ 354.00           | 3                | \$ 1062.00         |
| 2   | Diseñador 2 | Mes    | 1    | \$ 354.00           | 3                | \$ 1062.00         |
| <b>Valor total del diseño del prototipo [USD]</b> |             |        |      |                     |                  | <b>\$ 2,124.00</b> |

Tabla 47.

### Resumen de costos directos para la fabricación del prototipo

| Item  | Descripción                          | Valor total [USD]  |
|---|--------------------------------------|--------------------|
| 1   | Valor total de materiales            | \$ 811.08          |
| 2   | Valor total mano de obra directa     | \$ 860.00          |
| 3   | Valor total del diseño del prototipo | \$ 2124.00         |
| <b>Valor total de los costos directos de la fabricación [USD]</b> |                                      | <b>\$ 3,795.08</b> |

### Costos directos para la operación del prototipo

El funcionamiento del prototipo de secador solar, involucra una serie de rubros que son necesarios para la operación y las pruebas de funcionamiento del equipo, entre los que figuran los costos directos como instrumentación y materia prima.

**Tabla 48.**

### Costos directos de instrumentación y materia prima

| Item  | Descripción                     | Proveedor               | Cant | Valor unitario [USD] | Valor total [USD] |
|---|---------------------------------|-------------------------|------|----------------------|-------------------|
| 1   | Ají (Capsicum annum) kg         | Comunidad el Cabuyal    | 75   | \$ 0.60              | \$ 45.00          |
| 2   | Sensor de humedad DHT-11        | MEGA ELECTRONICS        | 4    | \$ 4.00              | \$ 16.00          |
| 3   | Sensor de temperatura LM35      | MEGA ELECTRONICS        | 15   | \$ 0.70              | \$ 10.50          |
| 4   | ARDUINO MEGA 2560               | MEGA ELECTRONICS        | 1    | \$ 29.46             | \$ 29.46          |
| 5   | Resistencias eléctricas de 1 kΩ | MEGA ELECTRONICS        | 10   | \$ 0.02              | \$ 0.18           |
| 6   | Cable UTP m                     | MEGA ELECTRONICS        | 20   | \$ 1.00              | \$ 20.00          |
| 7   | Cable para protoboard           | MEGA ELECTRONICS        | 10   | \$ 0.10              | \$ 1.00           |
| 8   | Pantalla LCD de 16x2            | MEGA ELECTRONICS        | 1    | \$ 12.40             | \$ 12.40          |
| 9   | Interfaz I2C                    | MEGA ELECTRONICS        | 1    | \$ 5.00              | \$ 5.00           |
| 10  | Cautin eléctrico                | MEGA ELECTRONICS        | 1    | \$ 7.00              | \$ 7.00           |
| 11  | Anemómetro                      | INSTRUMENTACIÓN ALVAREZ | 1    | \$ 45.00             | \$ 45.00          |
| 12  | Balanza 300 g x 0.01 g          | INSTRUMENTACIÓN ALVAREZ | 1    | \$ 25.00             | \$ 25.00          |
| 13  | Multímetro                      | MERCADO LIBRE           | 1    | \$ 60.00             | \$ 60.00          |
| 14  | Alquiler de piranómetro         | ----                    | 1    | \$ 75.00             | \$ 75.00          |
| <b>Subtotal [USD]</b>   |                                 |                         |      |                      | <b>\$ 351.54</b>  |
| <b>IVA [12%]</b>  |                                 |                         |      |                      | <b>\$ 42.18</b>   |
| <b>Valor total de materiales directos para la operación [USD]</b> |                                 |                         |      |                      | <b>\$ 393.72</b>  |

## 5.2 COSTOS INDIRECTOS

Son aquellos que no están relacionados directamente en la construcción del prototipo de secado, pero son parte de los costos de fabricación como son los mano de obra indirecta, transporte, etc.

### Costos indirectos para la fabricación del prototipo

Los costos indirectos involucrados en la construcción del prototipo de secador solar se encuentra desde la tabla 49 a la 53

**Tabla 49.**

### Costos indirectos por asesoramiento para el diseño del prototipo

| Item                                      | Descripción         | Unidad | Cant | Valor unitario [USD] | Horas de trabajo | Valor mensual [USD] |
|---|---------------------|--------|------|----------------------|------------------|---------------------|
| 1   | Director de tesis   | Hora   | 1    | \$20.00              | 40               | \$ 800.00           |
| 2   | Codirector de tesis | Hora   | 1    | \$20.00              | 40               | \$ 800.00           |
| <b>Valor total de asesoramiento [USD]</b> |                     |        |      |                      |                  | <b>\$1,600.00</b>   |

**Tabla 50.**

### Costos de mano de obra indirecta

| Item  | Descripción | Unidad      | Cant | Valor diario [USD] | Días de trabajo | Valor mensual [USD] |
|---|-------------|-------------|------|--------------------|-----------------|---------------------|
| 1   | Supervisor  | Hora/hombre | 1    | \$ 51.60           | 7               | \$ 361.20           |
| 2   | Bodeguero   | Hora/hombre | 1    | \$ 18.40           | 10              | \$ 184.00           |
| <b>Valor total mano de obra indirecta [USD]</b> |             |             |      |                    |                 | <b>\$ 545.20</b>    |

**Tabla 51.**

### Costos de servicios básicos

| Item                                       | Descripción       | Unidad  | Cant | Valor unitario [USD] | Valor total [USD] |
|--|-------------------|---------|------|----------------------|-------------------|
| 1  | Energía Eléctrica | kWh     | 1200 | \$ 0.10              | \$ 120.00         |
| 2  | Agua potable      | m3      | 54   | \$ 1.85              | \$ 99.90          |
| 3  | Teléfono          | Minutos | 360  | \$ 0.17              | \$ 61.20          |
| 4  | Internet          | 3 Mbps  | 4    | \$35.00              | \$ 140.00         |
| <b>Valor total servicios básicos [USD]</b> |                   |         |      |                      | <b>\$ 421.10</b>  |

**Tabla 52.**  
**Costos indirectos varios**

| Item   | Descripción         | Cant | Valor total [USD] |
|--|---------------------|------|-------------------|
| 1  | Insumos de oficina  | 1    | \$ 40.00          |
| 2  | Transporte          | 1    | \$ 70.00          |
| 3  | Insumos de limpieza | 1    | \$ 16.00          |
| <b>Valor total de costos indirectos varios [USD]</b> |                     |      | <b>\$ 126.00</b>  |

**Tabla 53.**  
**Resumen de costos indirectos para la fabricación del prototipo**

| Item  | Descripción                             | Valor total [USD]  |
|---|---|--------------------|
| 1   | Valor total de asesoramiento            | \$ 1600.00         |
| 2   | Valor total mano de obra indirecta      | \$ 542.30          |
| 3   | Valor total servicios básicos           | \$ 421.10          |
| 4   | Valor total de costos indirectos varios | \$ 126.00          |
| <b>Valor total de los costos indirectos de la fabricación [USD]</b> |   | <b>\$ 2,689.40</b> |

### **Costos indirectos para la operación del prototipo**

Los costos indirectos en la fase de operación del prototipo son aquellos que no influyen directamente en el funcionamiento del secador entre los cuales se encuentran transporte del equipo, estadía en el lugar de pruebas, etc.

**Tabla 54.**  
**Costos indirectos de la operación del prototipo**

| Item  | Descripción                              | Cant | Valor total [USD]  |
|---|--|------|--------------------|
| 1   | Impresión de formato de pruebas          | 1    | \$ 10.00           |
| 2   | Capacitación a los moradores del Cabuyal | 2    | \$ 50.00           |
| 3   | Alquiler de transporte                   | 1    | \$ 150.00          |
| 4   | Alojamiento y movilización               | 2    | \$ 2400.00         |
| 5   | Costo de montaje                         | 1    | \$ 75.00           |
| <b>Valor total de costos indirectos de la fase de operación [USD]</b> |  |      | <b>\$ 2,685.00</b> |

### 5.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Debido a que el sistema de secado es un prototipo, la inversión inicial va ser mayor, ya que no se realiza una fabricación en serie lo que abarataría costos, además el proceso constructivo de este involucra tiempos más largos de fabricación, desperdicios de materiales mayores. Cabe mencionar que un prototipo también involucra costos de investigación, pruebas de funcionamiento y análisis de resultados, con el objetivo de recopilar información que permita evidenciar fortalezas y debilidades que presenta el prototipo y así hacer las mejoras correspondientes. A continuación se muestra la inversión necesaria para la fabricación, montaje y operación del prototipo de secador solar.

**Tabla 55.**

**Inversión total para la fabricación, montaje y operación del prototipo de secador solar**

| Item                                  | Descripción  | Valor total [USD]  |
|---------------------------------------|--|--------------------|
| 1                                     | Valor total de los costos directos de la fabricación     | \$ 3,792.08        |
| 2                                     | Valor total de los costos indirectos de la fabricación   | \$ 2,689.40        |
| 3                                     | Valor total de materiales directos para la operación     | \$ 393.72          |
| 4                                     | Valor total de costos indirectos de la fase de operación | \$ 2,685.00        |
| <b>Valor total de inversión [USD]</b> |  | <b>\$ 9,563.20</b> |

Es importante mencionar que el prototipo va ser usado por la comunidad del Cabuyal para elaboración de insecticidas, en donde los únicos beneficiarios son los pobladores de dicho lugar, además este prototipo fue diseñado y construido con fines de investigación para conocer el comportamiento térmico del sistema de secado por convección natural utilizando como fuente absorbidora de energía un colector-almacenador en lecho de rocas.

Del análisis de costo se obtuvo que la inversión inicial necesaria para el prototipo es de \$ 9,563.20, este valor puede ser recuperado en la operación del sistema debido a que el mismo no requiere de energía eléctrica y de ningún combustible fósil a diferencia de otros secadores.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo de secador solar para la deshidratación del capsicum annum (ají) con un flujo de aire por convección natural de 0.01 kg/s y un tiempo de secado de 39 horas, consta de un colector de 2.0x0.6x0.01 m con una área de colección de 1.2 m<sup>2</sup>, un lecho de roca volcánica con espesor de 0.05 m que entrega una energía de 105 W alcanzando una temperatura superficial del lecho de 40.6 °C, temperatura media del aire de 31.0 °C, con una eficiencia de 31.3 %; una cámara de secado de 1.2x1.1x0.6 m de 25 kg de capacidad con una temperatura interior de 30 °C, y temperatura de salida de 26 °C a una humedad del 49% con una eficiencia de 50.3%. El sistema de secado tiene una eficiencia del 16.88 %, que se encuentran dentro de los parámetros de secado solar.
- La humedad del ají se obtuvo mediante el método gravimétrico por desecación determinando una humedad inicial en base húmeda del 87%, con una humedad crítica del 64% y humedad de equilibrio entre el 8 al 10 %; y la curva de secado se obtiene de los datos de humedad vs tiempo.
- El modelo matemático para el calentamiento del lecho de roca y del aire que circula en él depende de las condiciones ambientales promedio como son la radiación global de la zona que es de 922 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 20 °C, la geometría del colector, el flujo de aire, y las propiedades de transferencia de calor del aire; se obtuvo un error porcentual del 11.5% de lo planteado vs lo experimental, valor que se encuentra dentro de los parámetros de diseño térmico.

- De las simulaciones del comportamiento térmico del colector se determina que la eficiencia depende de su geometría, principalmente de la separación que exista entre el lecho de rocas y la cubierta con la cual guarda una relación inversamente proporcional. La cantidad de energía almacenada depende del espesor del lecho, guardando una relación directamente proporcional.
- El prototipo fue construido con materiales adecuados y de adquisición en el mercado nacional, del diseño estructural se obtiene los perfiles para la cámara de secado de 25x25x2 mm y del colector de 50x50x4 mm; el estudio por rigidez muestra que el desplazamiento máximo de la estructura es de 0.251 mm, que se encuentra en los rangos admisibles de los materiales.
- La variación de la masa de agua contenida del ají con respecto al tiempo presenta un comportamiento similar para las bandejas 1,2 y 4, logrando secarse en un tiempo aproximado de 31 horas, a diferencia de lo que ocurrió en la bandeja 3, la cual requirió de 7 horas adicionales para llegar a una humedad del 11%. Dicho tiempo adicional se produjo por la disminución del coeficiente de convección del aire en la bandeja por la disminución de la velocidad.
- El gradiente de temperatura producido entre la temperatura media del aire y la temperatura ambiente fue de 15 °C que permite que exista una diferencia de densidades provocando que el movimiento del aire sea por convección natural con una masa total para el secado de 1544 kg.
- El capital necesario para la fabricación del prototipo es de \$ 9,563.20, valor que en su mayor proporción está dado por el diseño, instrumentación para pruebas y operación del prototipo; el valor neto para producción de equipos en condiciones similares al propuesto sería de un 40 % del valor total.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el mantenimiento y la operación del sistema de secado se lo realice siguiendo el manual de usuario de la máquina que se encuentra en el anexo.
- Se recomienda que para obtener un secado homogéneo en todas las bandejas y reducir el tiempo total del proceso, que la radiación incida directamente sobre el producto y que el movimiento del aire pueda ser por convección forzada, convirtiendo al equipo en un sistema mixto.
- Se debe realizar un estudio sobre diferentes materiales capacitivos para lechos de secadores que permitan que el almacenamiento de energía aumente, la distribución del aire tenga un movimiento perpendicular y transversal a las bandejas contribuyendo así al mejoramiento de esta tecnología.

## BIBLIOGRAFÍA

- Manuel , N. (s.f.). Modelação de sistemas de armazenamento de energia térmica para aumentar a penetração de energias renováveis na produção de electricidade.
- Ngola, M. (2013). Modelação de sistemas de armazenamento de energia térmica para aumentar a penetração de energias renováveis na produção de electricidade. *Tesis de pregrado.Técnico Lisboa*. Lisboa, Portugal.
- Handbook of industrial drying. (2006). Taylor & Francis Group, LLC.
- Transferencia de calor y masa*. (2011). McGraw-Hill.
- Conferencia Plurinacional e intercultural de soberanía alimentaria*. (2014). Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de Ley Orgánica del Régimen de Soberanía Alimentaria: <http://www.soberaniaalimentaria.gob.ec>
- (2015). Recuperado el 19 de Mayo de 2015, de <http://sensovant.com>
- SIGMA Electrónica Ltda*. (2015). Recuperado el 18 de Junio de 2015, de Temperatura y Humedad DHT11: <http://www.sigmaelectronica.net>
- Abrahão, D. (2009). Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo. *Tesis de posgrado.Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia MG, Brasil.
- Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo Internacional. (2009). Cadenas Productivas: Desarrollo e Integración de capacidades para la competitividad y sostenibilidad. Ecuador.
- Aldás, M. (2012). Uso de insecticidas en el cultivo de papa (*solanum tuberosum*), por los socios de la corporación de asociaciones agropecuarias del Cantón Quero "COAGRO-Q". *Tesis de pregrado. Universidad Técnica de Ambato*. Ambato, Ecuador.

- Andrade , P., & Calvopiña, W. (2013). Diseño y construcción de una maquina. *Escuela Politécnica del Ejército (previo a la obtención de ingeniero mecánico)*. Sangolquí, Ecuador: escuela politécnica del ejército.
- Arduino. (2015). *Arduino Genuino*. Recuperado el 13 de Junio de 2015, de <https://www.arduino.cc>
- Asociación Técnica Española de climatización y refrigeración. (2007). Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. IDAE.
- Ayadi, M., Mabrouk, S. B., Zouari, I., & Bellagi, A. (2014). Simulation and performance of a solar air collector and storage system for a drying unit. *Science Direct, 107*, 292-304.
- Bal, L., Satya, S., & Naik, S. N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products. *ScienceDirect, 14*, 2298-2314.
- Bracero, G., & Cabezas, M. (1992). Simulación de secadores solares para granos, del tipo directo e indirecto. *Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional* . Quito, Ecuador.
- Burbano, & Gordillo. (1990). Simulación de intercambiadores de calor. *Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional*. Quito, Ecuador: p.29.
- Cabrera, G., & Marín, C. (2009). Comportamiento de la temperatura del flujo de aire en un absorbedor solar. *Scielo, 7(2)*, 33-39.
- Calderón, F. (2003). Cultivo de pimientos y ajíes. Perú.
- Cengel, Y. (2004). *Transferencia de calor* (2 ed.). (J. H. Pérez, Trad.) México D.F: McGrawHill.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4 ed.). (Jasso, Trad.) México D.F: McGraw-Hill.

- Cobos, D. (2011). Proyecto de factibilidad para la exportación de pimiento picante (Ají) a Alemania 2011-2020. *Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica Equinoccial*. Quito, Ecuador.
- Comité Ejecutivo del código Ecuatoriano de la construcción. (1996). Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-10. *Sistema de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en el Ecuador*. Ecuador.
- Consejo Nacional de Electricidad. (2008). Atlas solar del Ecuador. Ecuador.
- Costales, R. (1990). Estudio del secado de granos mediante fluidización. *Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional*. Quito, Ecuador: p.40.
- Costales, R. (1995). Estudio del secado de granos mediante fluidización. *Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional*. Quito, Ecuador: p.40.
- Duffie, J., & Beckman, W. (1980). *Solar Engineering of thermal processes* (2 ed.). JOHN WILEY & SONS, INC.
- Earle, R. L., & Earle, M. D. (2015). *Unit operations in food processing*. Recuperado el 15 de Abril de 2015, de Dryer efficiencies: <http://www.nzifst.org.nz>
- El Centro Ecuménico de Promoción y Acción Social. (2003). Cultivo de pimientos y ajíes. Perú.
- Farinango, D. (2007). Caracterización molecular de la colección de ajíes (*capsicum spp*) y calabazas (*cucurbita spp.*) del banco de germoplasma del instituto nacional autónomo de investigaciones agropecuarias (INIAP), Ecuador. *Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*. Ibarra, Ecuador.
- Farinha, J., Joyce, A., Giestas, M., Horta, P., & Brites, M. (2009). Armaznamiento de Energía Solar Térmica. Lisboa, Portugal: LNEG.

- FCH Fundación Chile. (2015). *Energía y Cambio Climático Fundación Chile*. Recuperado el 19 de Mayo de 2015, de Seguidor solar EPPLEY con Piranómetro y Pirheliómetro en Fundación Chile: <http://solaratacama.cl>
- Food and agriculture organization of the United Nations. (2015). *Deposito de documentos de la FAO*. Recuperado el 7 de Marzo de 2015, de Secado de granos a altas temperaturas: <http://www.fao.org>
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *ScienceDirect*, 14, 1-30.
- García, E., & Fernández, I. (s.f.). Determinación de a humedad de un alimento por un método gavimétrico indirecto por desecación. *Departamento de tecnología de alimentos. Universidad Politécnica de Valencia*. España.
- Garg, H. P., Bandyopadhyay, B., & Sharma, V. K. (1995). Experimental study of an inexpensive solar collector cum storage system for agricultural uses. 35(4), 321-331.
- Gestión COPS. (2006). Plan Nacional de Implementación Ecuador. *Plan Nacional de Implementación para la gestión de los contaminantes orgánicos persistentes en el Ecuador*. Ecuador.
- Ginnings, D., & Furaka, G. (1953). *Journal of Amercian Chemical Society*, 75, 522-527.
- González, P. (2012). *Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas*. España.
- González, P. (2012). *Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solare combinadas*.
- Hamdan, M. (1998). Investigation of an inexpensive solar collector storage system. *Elsevier Science*, 39(5/6), 415-420.

- Hernández , J., Quinto, P., Cuevas, J., Acosta, R., & Aguilar, J. (2008). Estudio del secado de capsicum annum L a través del modelo de Luikov. *Caos Conciencia, 1*, 21-30.
- Herrera, C., & Montenegro, D. (2014). Diseño y construcción de un sistema de calentamiento de agua híbrida solar-eléctrico tipo breadbox. *Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional*. Quito, Ecuador.
- Herrera, M. (2012). Utilización del ají rocoto (*Capsicum pubescen*) y Ají colorado en la gastronomía cuencana. *Tesis de pregrado. Universidad de Cuenca*. Cuenca, Ecuador.
- Hill, P. (1970). *The science of engineering design*. United States of America: Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- Holman, J. (1998). *Transferencia de calor* (8 ed.). España: McGRAW-Hill.
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4 ed.). (R. Cruz, Trad.) México: PRENTICE HALL.
- Ingeniería sin fronteras. (2001).
- Instituto Ecuatoriano de estadísticas y censos. (Marzo de 2014). Producción Nacional. Ecuador.
- Instituto Nacional de Meteorología e hidrología. (2012). Anuario meteorológico 2010. *SIGIHM*. Quito, Ecuador.
- Instituto tecnológico y de estudios superiores de Occidente. (1995). Notas sobre el curso de Energía Solar. Jalisco, México.
- Instituto Valenciano de la Edificación. (2012). Productos y materiales. *Propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación energética*. Valencia: p.7.
- International Renewable Energy Agency. (2015). *Global Atlas for renewable energy*. Recuperado el 14 de Mayo de 2015, de Solar and wind maps: <http://globalatlas.irena.org>

- Jairaj, K. S., Singh, S. P., & Srikant, K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *ScienceDirect*, 83, 1698-1712.
- Jones, G. (2012). *Managers-Net*. Recuperado el 7 de Marzo de 2015, de Flow charting: <http://www.managers-net.com>
- Kreith, F., & Bohn, M. (2001). *Principios de transferencia de calor* (6 ed.). (R. N. Salas, Trad.) México: Thomson Learning.
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2012). *Principios de transferencia de calor*. México D.F: Cengage learning.
- Long, C., & Sayma, N. (2009). *Heat Transfer*. p.91.
- Lopez, E. (2015). Desarrollo de un nuevo condimento con ají (*Capsicum frutescens* L.) y chocho (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica Equinoccial*. Quito, Ecuador.
- Machado, M., & Vélez, R. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y almacenamiento congelado. *AMIDIQ*, 7(1), 41-54.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7 ed.). (R. Huerta, Trad.) México: McGRAW-HILL.
- Millan, C. (2008). Las plantas una opción saludable para el control de plagas. p.26. Uruguay.
- Ministerio de Ambiente. (2004). Inventario de plaguicidas COPs en el Ecuador. Ecuador.
- Ministerio de Ambiente. (2006). Plan nacional de implementación para la gestión de los contaminantes orgánicos persistentes en el Ecuador. Ecuador.
- Montero, I. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. *Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura*. Badajoz, España.

- Montes, S. (s.f.). Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género *Capsicum* que crecen y se cultivan en México.
- Nogueira, L. (2013). Composição química e atividade antioxidante de diferentes variedades de pimento (*Capsicum annum* L.). *Tesis de pregrado. Instituto Politécnico Escola Superior Agrária de Bragança*. Bragança, Portugal.
- Nonhebel, & Moss, A. (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. Recuperado el 7 de Mayo de 2015, de <https://books.google.com.ec>
- OLX. (2015). Recuperado el 18 de Junio de 2015, de Balanza digital: <http://guayaquil.olx.com.ec>
- OLX. (2015). Recuperado el 18 de Junio de 2015, de Anemometro digital velocidad del viento: <http://guayaquil.olx.com.ec>
- Palomino, J., Váquiro, H., Salamanca, G., & Hurtado, A. (2005). Elaboración y estudio analítico de las propiedades fisicoquímicas asociadas a la harina de pimiento (*Capsicum annum*). *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó D.L.C*, 23, 34-40.
- Perry, R., & Chilton, C. (1986). *Manual del Ingeniero Químico* (2 ed., Vol. II). México: McGraw-HILL.
- Portilla, Á., & Bracero, G. (1992). Apuntes seminario diseño de secadores. *Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional*.
- Pritchard, P., & Leylegian, J. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to fluid mechanics* (4 ed.). E.E.U.U: JOHN WILEY & SONS, INC.
- PROAJI. (2009). Uso de buenas prácticas agrícolas para acceder al mercado de exportación. p.32. Ecuador.
- Puertos, B., & Gastelu, E. (2011). Evaluación de diferentes dosis de fertilizantes compuestos (N,P,K) en el cultivo de chile jalapeño J-7

(*Capsicum annum* L) en la región de amantlán de los reyes, ver. *Tesis de Pregrado. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.*

REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR. (2015). NOÇÕES INICIAIS SOBRE O AQUECIMENTO SOLAR. Brasil.

Russon, J., Dunn, M., & Steele, F. (2009). Optimization of a convective air flow solar food dryer. *International Journal of food Engineering*, 5(1).

Salas, R. (2009). Catálogo de ají de ecotipos conservados en campos de agricultores. Bolivia.

Salcedo, S., & Guzmán, L. (2014). Agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

Sensovant. (2015). Recuperado el 20 de Julio de 2015, de Piranómetro: <http://sensovant.com>

SENSOVANT. (2015). *Sensor de radiación LP02*. Recuperado el 19 de Mayo de 2015, de Piranómetro portátil: <http://sensovant.com>

Siguencia, M. (2010). Caracterización físico química y nutricional del ají (*Capsicum baccatum*) en dos estados de madurez y cultivados en dos suelos endofoclimáticos del Ecuador. *Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.*

Sousa, I. (2012). Análise teórica-experimental de secador solar para agricultura familiar por termografia de infravermelho e transformação integral. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.*

Stackhouse, P. (2015). NASA. Recuperado el 16 de Marzo de 2015, de <https://eosweb.larc.nasa.gov>

Staicovici, M. (2014). *Coabsorbent and Thermal Recovery Compression Heat Pumping Technologies-Heat and Mass Transfer*. New York, E.E.U.U: Springer.

Touloukian, Y. S., & Makita, T. (1976). *Specific Heat Nonmetallic Liquids and Gases*. New York: IFI/PLENUM. p.169.

Tratejant. (2015). *Sensor de temperatura LM35*. Recuperado el 12 de Junio de 2015, de <http://www.tratejant.es>

UBICA. (2014). Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de <http://www.ubica.ec>

Vines, R. (Octubre de 1960). *Transation of Asme*. 80, 48-52.

Yanggen, D., Crissman, C., & Espinosa, P. (2002). *Los plaguicidas impacto en produccion, salud y medio ambiente en el Carchi, Ecuador* (Primera ed.). Quito, Ecuador.

## **ANEXOS**

**ANEXO A. PLANOS DE TALLER Y CONJUNTO DEL SISTEMA DE  
SECADO**

**ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA  
HUMEDAD DEL AJÍ**

## **ANEXO C. ITERACIONES DEL TIEMPO DE SECADO**

**ANEXO D. SIMULACIÓN DEL COLECTOR-ALMACENADOR EN EL  
ESTADO TRANSITORIO**

**ANEXO E. DATOS OBTENIDOS DE LA CARTA PSICROMÉTRICA  
PARA EL AIRE EN EL PROCESO DE SECADO**

**ANEXO F. SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL COLECTOR-  
ALMACENADOR**

**ANEXO G. SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CÁMARA DE  
SECADO**

**ANEXO H. MATRIZ DE PUNTOS PONDERADOS PARA LA  
SELECCIÓN DEL ESPESOR DEL LECHO DE AJÍ**

**ANEXO I. MATRIZ DE PUNTOS PONDERADOS PARA LA  
SELECCIÓN DEL AISLANTE TÉRMICO PARA LA CÁMARA DE SECADO**

**ANEXO J. MATRIZ DE PUNTOS PONDERADOS PARA LA  
SELECCIÓN DEL MATERIAL ESTRUCTURAL**

**ANEXO K. CÓDIGO DEL PROGRAMA PARA LA ADQUISICIÓN DE  
DATOS**

**ANEXO L. DIAGRAMAS DE FLUJO Y HOJAS DE PROCESO DE  
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO**

**ANEXO M. MANUAL DE INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y  
MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE SECADO**

**ANEXO N. CÁLCULO POR RIGIDEZ DE LA ESTRUCTURA DEL  
BASTIDOR DEL COLECTOR Y LA CÁMARA DE SECADO**

**ANEXO O. FORMATOS PARA LA TOMA DE DATOS PARA LAS  
PRUEBAS DEL SISTEMA DE SECADO**

**ANEXO P. GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN  
VACÍO Y CON CARGA DEL SISTEMA DE SECADO**

**ANEXO Q. CURVAS DE VARIACIÓN DE LA MASA EN FUNCIÓN DEL  
TIEMPO DE LAS PRUEBAS CON CARGA DEL SISTEMA DE SECADO**

**ANEXO R. CURVAS DE LA RADIACIÓN GLOBAL DURANTE LAS  
PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA DE SECADO**

## **ANEXO R. EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO**

## **ANEXO S. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO**