



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA  
DE BOMBA DE CALOR PARA UNA SECADORA DE CACAO  
ROTATIVA DE FLUJO CONSTANTE**

**CARLOS ALFREDO ZHIGUI LOJA**

**Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y  
Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación  
Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del  
grado de:**

**MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO**

**Riobamba – Ecuador**

**Junio - 2021**



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado Diseño y construcción de un prototipo de sistema de bomba de calor para una secadora de cacao rotativa de flujo constante, de responsabilidad del señor Zhigui Loja Carlos Alfredo, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD.  
**PRESIDENTE**

Š ă Å ò à ˇ á á [   
 P ä æ [ Å   
 Ö Æ ^ ä æ   
 QR code and digital signature data

Ing. Carlos José Santillán Mariño; MsC  
**DIRECTOR**

Firmado electrónicamente por:  
**CARLOS JOSE  
SANTILLAN  
MARINO**

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla; Mag.  
**MIEMBRO**

Firmado electrónicamente por:  
**EDWIN  
RODOLFO POZO**

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes; Mag.  
**MIEMBRO**

Firmado electrónicamente por:  
**JORGE ISAIAS  
CAICEDO REYES**

Riobamba, junio 2021

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Zhigui Loja Carlos Alfredo, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Firmado electrónicamente por:

**CARLOS  
ALFREDO  
ZHIGUI LOJA**

**ZHIGUI LOJA CARLOS ALFREDO**  
No. Cédula: 0704173657

Yo, Zhigui Loja Carlos Alfredo, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.



Firmado electrónicamente por:

**CARLOS  
ALFREDO  
ZHIGUI LOJA**

**ZHIGUI LOJA CARLOS ALFREDO**

No. Cédula:0704173657

## **DEDICATORIA**

La presente investigación la dedico a Dios por permitirme cumplir esta meta y también se dedica a mis padres; Victoria Loja y Gonzalo Zhigui, a mis hermanas, Carmen y Melania, por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han brindado.

El desarrollo de esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de todas las personas que me colaboraron el Tnlg. Quinde y Tnlg. Ciro Armijos, a mis amigos a todos ellos va dedicado este, Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo.

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso el más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). También mi gratitud al Ing. Carlos José Santillán Mariño; Msc, Director, por la activa y diligente revisión del presente trabajo y por otorgarme el apoyo y la confianza incondicional para poder terminar con éxito esta etapa de mi vida académica, se destaca y agradece el aporte de los miembros Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla; y al Ing. Isaías Caicedo; Mg, ya que con la ayuda de sus incalculables conocimientos, su tiempo, dedicación y esfuerzo se logró la estructuración y perfeccionamiento de la presente investigación.

Mi agradecimiento a todos los amigos que me ayudaron con sus valiosos recursos, como tiempo, técnicas para fabricación, uso de laboratorios y recomendaciones para la elaboración del presente estudio.

Zhigui Loja Carlos Alfredo

## CONTENIDO

|   |       |
|---|-------|
| RESUMEN.....  | xvii  |
| ABSTRACT.....   | xviii |
| CAPÍTULO I.....   | 1     |
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1     |
| 1.1 Situación Problemática.....                                 | 1     |
| 1.2 Formulación del problema.....                               | 2     |
| 1.3 Preguntas directrices o específicas.....                    | 2     |
| 1.4 Justificación.....  | 2     |
| 1.5 Objetivos de la investigación.....                          | 3     |
| 1.5.1 <i>Objetivo General</i> .....                             | 3     |
| 1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....                        | 3     |
| 1.6 Hipótesis.....  | 4     |
| 1.6.1 <i>Hipótesis General</i> .....                            | 4     |
| 1.6.2 <i>Hipótesis Específicas</i> .....                        | 4     |
| 1.6.3 <i>Identificación de variables</i> .....                  | 4     |
| 1.6.4 <i>Operacionalización de Variables</i> .....              | 5     |
| 1.6.5 <i>Matriz de consistencia</i> .....                       | 6     |
| CAPÍTULO II.....  | 8     |
| 2. MARCO TEÓRICO.....   | 8     |
| 2.1 Estado del Arte.....  | 8     |
| 2.2 Secado artificial de cacao.....                             | 9     |
| 2.2.1 <i>Secado rotativo de cacao</i> .....                     | 9     |
| 2.2.2 <i>Secador tipo batch</i> .....                           | 9     |
| 2.2.3 <i>Secadora del tipo solar</i> .....                      | 10    |
| 2.2.4 <i>Secado por bomba de calor</i> .....                    | 11    |
| 2.3 Propiedades de las pepas de cacao.....                      | 12    |
| 2.4 Propiedades del aire húmedo.....                            | 16    |
| 2.4.1 <i>Psicometría del aire en una cámara de secado</i> ..... | 17    |
| 2.4.2 <i>Calentamiento simple</i> .....                         | 18    |
| 2.4.3 <i>Enfriamiento con deshumidificación</i> .....           | 18    |
| 2.4.4 <i>Mezcla adiabática de flujos de aire</i> .....          | 19    |
| 2.5 Propiedades mecánicas de la pepa de cacao.....              | 19    |
| 2.5.1 <i>Rigidez de contacto</i> .....                          | 20    |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.5.2  | <i>Módulo de Elasticidad de contacto</i> .....  | 21 |
| 2.5.3  | <i>Impacto inelástico</i> .....   | 21 |
| 2.6    | <b>Humedad de equilibrio</b> .....  | 22 |
| 2.7    | <b>Modelo matemático del secado de cacao</b> .....  | 22 |
| 2.7.1  | <i>Fórmulas de los coeficientes de transferencia de calor y masa</i> .....                  | 24 |
| 2.8    | <b>Balance de masa y energía en un secador</b> .....  | 25 |
| 2.8.1  | <i>Balance de masa</i> .....  | 26 |
| 2.8.2  | <i>Balance de energía en un secador</i> .....   | 26 |
| 2.9    | <b>Movimiento de los sólidos en el secador</b> .....  | 28 |
| 2.9.1  | <i>Caída de las pepas de cacao desde los elevadores</i> .....                               | 28 |
| 2.9.2  | <i>Angulo representativo y altura de caída promedio</i> .....                               | 32 |
| 2.9.3  | <i>Restricciones geométricas de los secadores rotativos</i> . .....                         | 33 |
| 2.10   | <b>Sistema de la bomba de calor</b> .....   | 33 |
| 2.10.1 | <i>Ciclo de refrigeración por compresión de vapor</i> .....                                 | 34 |
| 2.10.2 | <i>Representación esquemática del principio de secado por bomba de calor</i> .....          | 36 |
| 2.10.3 | <i>Control de deshumidificación del aire de secado</i> . .....                              | 36 |
| 2.10.4 | <i>Intercambiadores de calor (condensador y evaporador)</i> .....                           | 37 |
| 2.11   | <b>Pruebas de normalidad</b> .....  | 39 |
| 2.12   | <b>Cálculo de conductos de Aire</b> .....   | 39 |
| 2.12.1 | <i>Definición de pérdida de carga</i> .....   | 39 |
| 2.12.2 | <i>Criterio de selección del ventilador</i> .....   | 41 |
| 2.12.3 | <i>Cálculo del espesor del aislamiento térmico</i> .....                                    | 42 |
|        | <b>CAPÍTULO III</b> .....   | 45 |
| 3.     | <b>METODOLOGIA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SECADOR POR BOMBA DE CALOR</b> .....                | 45 |
| 3.1    | <b>Obtención de las propiedades físicas de las pepas de cacao</b> .....                     | 45 |
| 3.1.1  | <i>Obtención de la densidad de una pepa de cacao en función de su humedad</i> .....         | 45 |
| 3.1.2  | <i>Obtención de la densidad aparente de una pepa de cacao en función de su humedad</i> . 50 |    |
| 3.2    | <b>Diseño del tambor rotativo</b> .....   | 51 |
| 3.2.1  | <i>Masa del producto en función de la posición angular del tambor rotativo</i> . .....      | 51 |
| 3.2.2  | <i>Simulación del rebote de una pepa de cacao en Adams</i> . .....                          | 57 |
| 3.2.3  | <i>Simulación del movimiento de una pepa de cacao en Adams</i> .....                        | 61 |
| 3.2.4  | <i>Esfuerzo de contacto de una pepa de cacao realizado en Ansys</i> .....                   | 65 |
| 3.3    | <b>Consideraciones para el modelado termodinámico del secado de cacao</b> .....             | 68 |
| 3.3.1  | <i>Modelo numérico del proceso de secado sin considerar la humedad del aire</i> .....       | 69 |
| 3.3.2  | <i>Modelo termodinámico del secado de cacao considerando la humedad del aire</i> .....      | 77 |

|                             |  |            |
|-----------------------------|--|------------|
| <b>3.4</b>                  | <b>Análisis de la bomba de calor .....</b>   | <b>86</b>  |
| 3.4.1                       | <i>Análisis termodinámico del sistema. ....</i>  | 86         |
| 3.4.2                       | <i>Bomba de calor en un circuito abierto. ....</i>   | 90         |
| 3.4.3                       | <i>Diseño del sistema de recirculación de aire caliente para la bomba de calor. ....</i>     | 94         |
| 3.4.3.1                     | <i>Análisis de la recirculación evaporador-condensador .....</i>                             | 96         |
| 3.4.3.2                     | <i>Diseño del bypass para la recirculación del aire. ....</i>                                | 99         |
| <b>3.5</b>                  | <b>Diseño de los ductos de recirculación del aire de secado para la bomba de calor. .</b>    | <b>103</b> |
| 3.5.1                       | <i>Selección de las dimensiones del conducto a la salida de la cámara de secado. ....</i>    | 103        |
| 3.5.2                       | <i>Cálculo de las pérdidas de carga en los ductos .....</i>                                  | 104        |
| 3.5.3                       | <i>Cálculo del espesor del aislamiento térmico .....</i>                                     | 106        |
| <b>CAPÍTULO IV .....</b>    |  | <b>108</b> |
| <b>4.</b>                   | <b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>   | <b>108</b> |
| 4.1                         | <b>Descripción de la maquina secadora de cacao por bomba de calor. ....</b>                  | <b>108</b> |
| 4.2                         | <b>Puntos de medición de los parámetros de la bomba.....</b>                                 | <b>109</b> |
| 4.3                         | <b>Procedimiento para determinar la humedad de las pepas de cacao. ....</b>                  | <b>110</b> |
| 4.3.1                       | <i>Determinación del contenido de humedad.....</i>   | 110        |
| 4.4                         | <b>Obtención de los datos de las pruebas realizadas. ....</b>                                | <b>111</b> |
| 4.4.1                       | <i>Obtención de la curva de secado de los granos de cacao con el método tradicional... </i>  | <i>111</i> |
| 4.4.2                       | <i>Obtención de la curva de secado de los granos de cacao con la bomba de calor. ....</i>    | <i>112</i> |
| 4.4.3                       | <i>Obtención de la curva de temperatura del aire de secado a la salida de la cámara. ...</i> | <i>113</i> |
| 4.4.4                       | <i>Obtención de la curva de humedad del aire de secado a la salida de la cámara.....</i>     | <i>113</i> |
| 4.5                         | <b>Temperatura en los conductos de recirculación de aire de secado.....</b>                  | <b>114</b> |
| 4.6                         | <b>Presión del refrigerante en el ciclo de la bomba de calor.....</b>                        | <b>116</b> |
| 4.7                         | <b>Comparación entre el secado solar y el secado por bomba de calor. ....</b>                | <b>116</b> |
| 4.7.1                       | <i>Consumo energético del prototipo de sistema de la bomba de calor.....</i>                 | <i>116</i> |
| 4.7.2                       | <i>Porcentaje de reducción del tiempo de secado al sol y por la bomba de calor. ....</i>     | <i>116</i> |
| 4.8                         | <b>Costo del prototipo.....</b>  | <b>119</b> |
| 4.9                         | <b>Trabajos futuros .....</b>  | <b>120</b> |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>    |  | <b>122</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b> |  | <b>123</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>         |  |            |
| <b>ANEXOS</b>               |  |            |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 1-1:</b> Identificación de variables.....  | 4   |
| <b>Tabla 2-1:</b> Operacionalización de Variables.....  | 5   |
| <b>Tabla 3-1:</b> Matriz de consistencia.....   | 6   |
| <b>Tabla 1-2</b> Coeficientes para determinar la presión de saturación.....   | 16  |
| <b>Tabla 2-2</b> Formulas para determinar las propiedades mecánicas de la pepa de cacao.....                        | 20  |
| <b>Tabla 1-3</b> Variación de la densidad con respecto a la humedad en base seca.....                               | 49  |
| <b>Tabla 2-3</b> Valores densidad aparente con respecto a la humedad en base seca. ....                             | 50  |
| <b>Tabla 3-3</b> Influencia de los parámetros del secador en función de la humedad del producto....                 | 56  |
| <b>Tabla 4-3</b> Parámetros de contacto de una pepa de cacao.....   | 58  |
| <b>Tabla 5-3</b> Parámetros de contacto de una pepa de cacao.....   | 61  |
| <b>Tabla 6-3</b> Resultados elementos finitos para una pepa de cacao longitudinal.....                              | 66  |
| <b>Tabla 7-3</b> Resultados elementos finitos para una pepa de cacao transversal.....                               | 67  |
| <b>Tabla 8-3</b> Coeficientes de transferencia de calor y masa.....   | 74  |
| <b>Tabla 9-3</b> Correlaciones de los coeficientes de transferencia de calor y masa.....                            | 79  |
| <b>Tabla 10-3</b> Tiempo de secado, humedad relativa y flujo de calor con diferentes valores de caudal de aire..... | 84  |
| <b>Tabla 11-3</b> Valores de las propiedades de la bomba de calor por cada punto.....                               | 89  |
| <b>Tabla 12-3</b> Potencia calorífica y mecánica de la bomba de calor.....  | 90  |
| <b>Tabla 13-3</b> Coeficiente de transferencia de calor en el condensador.....                                      | 93  |
| <b>Tabla 14-3</b> Relación entre la humedad, temperatura y tiempo en la cámara de secado.....                       | 95  |
| <b>Tabla 15-3</b> Coeficiente de transferencia de calor en el evaporador.....                                       | 97  |
| <b>Tabla 16-3</b> Temperatura –Humedad en los diferentes puntos de recirculación de la bomba....                    | 99  |
| <b>Tabla 17-3</b> Valores de Temperatura –Humedad y porcentaje de flujo. ....                                       | 101 |
| <b>Tabla 18-3</b> Variación del caudal en el evaporador y por el bypass en función del tiempo.....                  | 102 |
| <b>Tabla 19-3</b> Pérdida de carga por rozamiento en los tramos de retorno.....                                     | 104 |
| <b>Tabla 20-3</b> Pérdida de carga por rozamiento en los tramos de retorno.....                                     | 104 |
| <b>Tabla 21-3</b> Pérdida de carga en accesorios.....   | 104 |
| <b>Tabla 22-3</b> Pérdida de calor en los ductos con y sin aislante de espesor 38 mm.....                           | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 23-3</b> Pérdida de calor en los ductos con y sin aislante de espesor 50 mm ..... | 107 |
| <b>Tabla 1-4:</b> Valores de humedad en función del tiempo del secado solar .....          | 111 |
| <b>Tabla 2-4:</b> Diferencia entre el sistema secado por bomba de calor y solar. ....      | 117 |
| <b>Tabla 3-4:</b> Determinación de la hipótesis, valoración de variables.....              | 117 |
| <b>Tabla 4-4:</b> Costo del prototipo .....  | 119 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1-2:</b> Secado al sol .....  | 8  |
| <b>Figura 2-2:</b> Esquema del sistema de secado rotativo para cacao .....                          | 9  |
| <b>Figura 3-2:</b> Secador Tipo Bath.....   | 10 |
| <b>Figura 4-2:</b> Vista en planta y la elevación del sistema solar experimental .....              | 10 |
| <b>Figura 5-2:</b> Relación entre el tiempo de secado vs porcentaje de humedad .....                | 11 |
| <b>Figura 6-2:</b> Esquema del prototipo de secadora por bomba de calor .....                       | 12 |
| <b>Figura 7-2:</b> Forma y dimensiones de la pepa de cacao .....                                    | 13 |
| <b>Figura 8-2:</b> Variación de la densidad de la pepa de cacao. ....                               | 14 |
| <b>Figura 9-2:</b> Contenido de humedad en base húmeda y coeficiente de fricción estático. ....     | 15 |
| <b>Figura 10-2</b> Proceso de secado idealizado .....   | 17 |
| <b>Figura 11-2</b> Proceso isoentálpico del aire de secado .....                                    | 17 |
| <b>Figura 12-2:</b> Calentamiento simple.....   | 18 |
| <b>Figura 13-2:</b> Enfriamiento con deshumidificación. ....  | 18 |
| <b>Figura 14-2:</b> Disposición de las pepas de cacao y la fuerza aplicada .....                    | 19 |
| <b>Figura 15-2:</b> Transferencia de calor en el proceso de secado .....                            | 27 |
| <b>Figura 16-2:</b> Sistemas coordenadas del secador rotativo .....                                 | 28 |
| <b>Figura 17-2:</b> Esquema de los elevadores de dos segmentos .....                                | 28 |
| <b>Figura 18-2:</b> Parámetros para determinar $R_o$ y $\delta$ .....                               | 29 |
| <b>Figura 19-2:</b> Sólidos en cascada dentro del secador rotativo.....                             | 30 |
| <b>Figura 20-2:</b> Etapas del vaciado.....   | 30 |
| <b>Figura 21-2:</b> Áreas de las paletas- Caso 1.....   | 31 |
| <b>Figura 22-2:</b> Áreas de las paletas- Caso 2.....   | 31 |
| <b>Figura 23-2:</b> Bomba de calor en modo calentamiento y enfriamiento.....                        | 34 |
| <b>Figura 24-2:</b> Esquema y diagrama P-h para el ciclo de refrigeración.....                      | 34 |
| <b>Figura 25-2</b> Representación esquemática del principio de secado por bomba de calor.....       | 36 |
| <b>Figura 26-2:</b> Mecanismo de control para regular la humedad del aire de secado.....            | 37 |
| <b>Figura 27-2:</b> Variación de las temperaturas de los fluidos en un condensador y evaporador.... | 37 |
| <b>Figura 1-3</b> Pepa de cacao .....   | 45 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2-3:</b> Pruebas de normalidad a la medición de la masa de las pepas de cacao.....                  | 46 |
| <b>Figura 3-3</b> Pruebas de normalidad de las dimensiones de las pepas de cacao. ....                        | 46 |
| <b>Figura 4-3</b> Histograma de las mediciones de la masa .....   | 46 |
| <b>Figura 5-3</b> Histograma mediciones de la longitud L.....   | 47 |
| <b>Figura 6-3</b> Histograma de mediciones de la longitud T .....   | 47 |
| <b>Figura 7-3</b> Histograma de mediciones de la longitud W.....  | 47 |
| <b>Figura 8-3</b> Pepas de cacao húmeda y seca sumergida en agua .....  | 48 |
| <b>Figura 9-3</b> Masa en función de la posición angular .....  | 55 |
| <b>Figura 10-3:</b> Dimensiones de las paletas del tambor rotativo.....                                       | 56 |
| <b>Figura 11-3</b> Esquema rebote de una pepa de cacao en Adams .....   | 57 |
| <b>Figura 12-3:</b> Valores de ingreso para la función contacto de Adams. ....                                | 59 |
| <b>Figura 13-3:</b> Rebote de una pepa de cacao seca .....  | 59 |
| <b>Figura 14-3:</b> Prueba de rebote pepa de cacao seca. ....   | 60 |
| <b>Figura 15-3:</b> Rebote de una pepa de cacao húmeda.....   | 60 |
| <b>Figura 16-3:</b> Secador rotativo en Adams. ....   | 61 |
| <b>Figura 17-3:</b> Posición y fuerza de contacto en un secador para una pepa de cacao seca.....              | 62 |
| <b>Figura 18-3:</b> Posición y fuerza de contacto en un secador para una pepa de cacao húmeda ....            | 62 |
| <b>Figura 19-3:</b> Energía cinética de la pepa de cacao seco.....  | 63 |
| <b>Figura 20-3:</b> Energía cinética de la pepa de cacao húmeda .....   | 63 |
| <b>Figura 21-3:</b> Variación de la energía cinética a 20 rpm.....  | 63 |
| <b>Figura 22-3:</b> Variación de la energía cinética a 30 rpm.....  | 64 |
| <b>Figura 23-3:</b> Variación de la energía cinética a 40 rpm.....  | 64 |
| <b>Figura 24-3:</b> Fuerza de contacto a 20 rpm .....   | 64 |
| <b>Figura 25-3:</b> Fuerza de contacto a 30 rpm .....   | 65 |
| <b>Figura 26-3</b> Fuerza de contacto a 40 rpm.....   | 65 |
| <b>Figura 27-3:</b> Simulación de una pepa de cacao en Ansys.....   | 66 |
| <b>Figura 28-3:</b> Esfuerzo de Von Mises aplicada a la sección longitudinal de una pepa de cacao             | 66 |
| <b>Figura 29-3:</b> Simulación de una pepa de cacao en Ansys aplicada una fuerza en sentido transversal ..... | 67 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 30-3:</b> Esfuerzo de Von Mises aplicada a una pepa de cacao transversal.....      | 68  |
| <b>Figura 31-3:</b> Volumen de control para el proceso de secado .....                       | 77  |
| <b>Figura 32-3:</b> Aire acondicionado tipo ventana .....                                    | 86  |
| <b>Figura 33-3:</b> Diagrama P-h para para el refrigerante R-22 .....                        | 90  |
| <b>Figura 34-3:</b> Psicometría del aire de salida del condensador.....                      | 93  |
| <b>Figura 35-3:</b> Esquema secado por bomba de calor sin recirculación de aire. ....        | 93  |
| <b>Figura 36-3:</b> Esquema secado por bomba de calor con recirculación de aire.....         | 94  |
| <b>Figura 37-3:</b> Esquema de recirculación de aire con bypass .....                        | 99  |
| <b>Figura 38-3:</b> Tramos de los conductos de la máquina. ....                              | 103 |
| <b>Figura 39-3:</b> Curva de presión y caudal el ventilador seleccionado. ....               | 105 |
| <b>Figura 1-4:</b> Fotos de la máquina secadora de cacao .....                               | 108 |
| <b>Figura 2-4:</b> Tablero de accionamiento de la maquina.....                               | 108 |
| <b>Figura 3-4:</b> Puntos de medición de las temperaturas y humedad del aire de secado ..... | 109 |
| <b>Figura 4-4:</b> Medidor de temperatura de aire de secado.....                             | 109 |
| <b>Figura 5-4:</b> Medidor de presión del refrigerante de la bomba de calor.....             | 110 |
| <b>Figura 6-4:</b> Medidor de humedad de los granos de cacao.....                            | 110 |
| <b>Figura 7-4:</b> Medición de humedad de secado solar. ....                                 | 111 |
| <b>Figura 8-4:</b> Pepas de caco húmedas y secas.....  | 117 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

|  |     |
|--|-----|
| <b>Gráfico 1-3:</b> Variación de la densidad del cacao en función de la humedad en base seca.....    | 49  |
| <b>Gráfico 2-3:</b> Variación de la densidad aparente del cacao en función de la humedad.....        | 51  |
| <b>Gráfico 3-3:</b> Masa de la paleta en función del ángulo .....                                    | 55  |
| <b>Gráfico 4-3:</b> Variación de la humedad de cada nodo de la pepa de cacao con aire seco .....     | 76  |
| <b>Gráfico 5-3:</b> Variación de la Temperatura de cada nodo de la pepa de cacao con aire seco ..... | 76  |
| <b>Gráfico 6-3:</b> Variación Humedad del cacao en función del tiempo considerando aire húmedo.      | 81  |
| <b>Gráfico 7-3:</b> Temperatura de la pepa de cacao considerando la humedad.....                     | 81  |
| <b>Gráfico 8-3:</b> Temperatura del aire de secado en función del tiempo .....                       | 82  |
| <b>Gráfico 9-3:</b> Humedad relativa del aire de secado en función del tiempo. ....                  | 82  |
| <b>Gráfico 10-3:</b> Flujo de calor total entre el aire de secado y las pepas de cacao. ....         | 83  |
| <b>Gráfico 11-3:</b> Variación de los parámetros con un caudal de 0,5 m <sup>3</sup> /s. ....        | 83  |
| <b>Gráfico 12-3:</b> Comparación entre las curvas de secado con respecto a la humedad.....           | 85  |
| <b>Gráfico 13-3:</b> Comparación entre las curvas de secado con respecto a la temperatura. ....      | 86  |
| <b>Gráfico 14-3:</b> Variación de la temperatura y humedad del aire de secado. ....                  | 95  |
| <b>Gráfico 15-3:</b> Esquema de recirculación de aire con bypass. ....                               | 102 |
| <b>Gráfico 1-4</b> Medición de humedad de secado solar. ....   | 112 |
| <b>Gráfico 2-4:</b> Curva de secado experimental vs idealizada. ....                                 | 112 |
| <b>Gráfico 3-4:</b> Curva de temperatura a la salida de la cámara de secado.....                     | 113 |
| <b>Gráfico 4-4:</b> Curva de humedad a la salida de la cámara de secado. ....                        | 114 |
| <b>Gráfico 5-4:</b> Curva de la temperatura entre el evaporador y el condensador.....                | 114 |
| <b>Gráfico 6-4:</b> Curva de la temperatura después del condensador.....                             | 115 |
| <b>Gráfico 7-4:</b> Curva del porcentaje de flujo por el bypass. ....                                | 115 |

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A.** Medidas tomadas de las 100 pepas de cacao.

**ANEXO B.** Programación realizada en Matlab para el secado de cacao sin considerar la humedad del aire.

**ANEXO C.** Programación realizada en Matlab para el secado de cacao considerando la humedad del aire.

**ANEXO D.** Coeficientes para el cálculo de pérdida de carga (C).

**ANEXO E.** Especificaciones ventilador centrífugo.

**ANEXO F.** Especificaciones ventilador centrífugos de media presión

**ANEXO G.** Especificaciones Controlador Maxwell TH900

**ANEXO H.** Especificaciones medidor de humedad de granos de cacao Wile.

**ANEXO I.** Proforma y especificaciones de una secadora de cacao industrial.

**ANEXO J:** Especificaciones del material aislante

**ANEXO K:** Máquina secadora de cacao

## RESUMEN

El presente trabajo surge de desarrollar un nuevo método de secado artificial a los ya conocidos, como es el secado solar y el secado artificial utilizando combustible diésel o gas, se indica estos por ser los más usados en la Ciudad de Machala y además de ayudar con una meta en el plan estratégico del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) que establece que para el año 2018-2022 en la agroindustria se desarrolle al menos una tecnología para el secado del cacao. Para el diseño del prototipo de sistema secado por bomba de calor primero se estableció un modelo numérico donde se resolvió las ecuaciones diferenciales parciales basadas en la segunda ley de Fick y la ecuación de conducción de calor de Fourier por elementos finitos utilizando Matlab, a estas resoluciones se añadieron las propiedades del aire húmedo y el balance de masa en un secador, para predecir el comportamiento de la temperatura y la humedad del aire de secado dentro de la cámara y de la variación de la humedad de las pepas de cacao en función del tiempo. A partir del modelo numérico se pudo enlazar con las ecuaciones termodinámicas de la bomba de calor y los conceptos de pérdidas de carga en los ductos para su diseño y poder establecer los flujos y las temperaturas en cada tramo del sistema. De la construcción del prototipo se realizaron pruebas para validar el modelo numérico de la variación de humedad de las pepas de cacao en función del tiempo y se obtuvo un error relativo medio de 10,88 % con respecto al experimental. Además, se obtuvo el error medio relativo de la temperatura y humedad a la salida de la cámara de secado de 4,32 y 10,5 % respectivamente. Con respecto al tiempo de secado se obtuvo una humedad en las pepas de cacao de un 8% en un tiempo de 21 horas, al comparar con el secado solar se obtuvo una reducción 30 % del tiempo.

**Palabras clave:** <BOMBA DE CALOR>, <HUMEDAD DE LAS PEPAS DE CACAO>, <TIEMPO DE SECADO>, <TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA>, <TRANSFERENCIA DE MASA>, <PERDIDAS DE CARGA>

LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS

Firmado digitalmente por  
LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,  
serialNumber=0602766974,  
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Fecha: 2021.05.14 16:22:47  
-05'00'



0058-DBRAI-UPT-IPEC-2021

## ABSTRACT

This work arises from developing a new artificial drying method to those already known, such as solar drying and artificial drying using diesel fuel or gas. These are indicated as being the most used in Machala, and also to help with a goal in the INIAP strategic plan which establishes that by the year 2018 -2022 in the agribusiness, at least one technological idea for drying cocoa must be developed. For the design of the prototype of a heat pump drying system, a numerical model was first established where the partial differential equations based on Fick's second law and the Fourier heat conduction equation by finite elements were solved using Matlab, to these resolutions humid air properties and mass balance were added in a dryer. To predict the behavior of the temperature and humidity of the drying air inside the chamber and of the variation of the humidity of the cocoa beans as a function of time. From the numerical model, it was possible to link with the thermodynamic equations of the heat pump and the concepts of pressure losses in the ducts for their design and to be able to establish the flows and temperatures in each section of the system. From the construction of the prototype, tests were carried out to validate the numerical model of the humidity variation of the cocoa beans as a function of time and a mean relative error of 10.88% was obtained with respect to the experimental one. In addition, the mean relative error of the temperature and humidity at the exit of the drying chamber was obtained at 4.32 and 10.5% respectively. Regarding the drying time, a humidity of 8% in the cocoa beans was obtained in 21 hours, when comparing with the solar drying a 30% reduction of the time was obtained.

**Key words:** <HEAT PUMP>, <COCOA BEANS MOISTURE>, <DRYING TIME>, <HEAT AND MASS TRANSFER>, <PRESSURE LOSS>

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Situación Problemática.

El cacao es una fruta tropical, sus cultivos se encuentran mayormente en la región costera y amazónica del Ecuador. Es un árbol con flores pequeñas que se observan en las ramas y producen una mazorca que contiene granos cubiertos de una pulpa rica en azúcar. En nuestro país existen dos tipos de cacao, el CCN51 y el denominado Cacao Nacional. Ecuador es el país con mayor participación en el mercado mundial con un 63% de acuerdo con las estadísticas de ProEcuador. Su buena producción y calidad en el año 2011 el Ecuador recibió el premio como el “mejor cacao por su calidad oral” y “mejor grano de cacao por región geográfica” en el Salón du Chocolat en París, Francia. (Guerreo H., 2017).

La producción de cacao ha generado ingresos a decenas de miles de familias campesinas principalmente de la provincia de los Ríos, Manabí, Guayas y El Oro. Esta producción se encuentra relacionada a las condiciones del ecosistema, siendo esto un factor determinante para incrementar el rendimiento. (Vera Chang, y otros, 2014).

En el procesamiento de cacao existen dos etapas críticas, que son el secado y la fermentación. Luego de la cosecha y fermentación viene la etapa de secado, cuya correcta practica permite desarrollar los precursores del sabor y aroma. Existen dos métodos para el secado del cacao, el secado al sol y el secado artificial, el primero se usa tendales de cemento o corredizos y por otro lado el secado artificial se realiza en secadores rotativos a Diesel, gas o leña, (Anecacao, 2016). Las tareas de secado y selección del cacao ecuatoriano son manuales en un 95% y tan solo un 5% cuentan con un proceso mecanizado o automatizado en el mejor de los casos, según la Asociación Nacional de Exportadores de Cacao del Ecuador ANECACAO.

El secado tradicional o secado al sol tiene los inconvenientes de que depende totalmente del clima, el cual es impredecible, se utiliza grandes áreas de terreno y un deterioro del producto debido a que se contamina con agentes externo, generalmente los pequeños productores tienden el cacao cerca de donde están los animales domésticos o de granja, los cuales contaminan los granos de cacao. El secado artificial que usa aire caliente posee una baja eficiencia térmica, que están alrededor del 9% al 27% para la convección natural y del 21% al 40% para secadores de convección forzada, (Hii, Law, & Law, 2013)

Los secadores artificiales que utilizan gas licuado de petróleo o diésel tienen un inconveniente de que se puede contaminar los granos cacao con el olor de la combustión, además en la actualidad con el posible retiro del subsidio a estos combustibles se puede incrementar el costo del secado, perjudicando al pequeño productor. Existen temas desarrollados como el de, (Lopez Chica, 2015), donde se utiliza la energía solar, este método resulta barato para el productor, pero en regiones donde esta forma de energía no es constante por la nubosidad, quedaría a expensas de este sistema; se menciona esto porque en la Ciudad de Machala en los meses de verano, existen hasta 3 o 4 días a la semana sin la energía solar.

En las épocas donde no es posible realizar el secado tradicional, lo productores optan por venderlo en baba, quedando expuestos a los precios que ofrecen los intermediarios, los cuales generalmente ofrecen precios bajos. Frente a este panorama surge la propuesta de utilizar otro método de secado el cual consiste en el secado por bomba de calor que funciona según el concepto de ciclo de refrigeración.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo optimizar el proceso de secado del cacao y reducir el tiempo empleado, para los pequeños productores de la Asociación de Trabajadores Autónomos Agrícolas Juan Pablo II de la Ciudad de Machala?

## **1.3 Preguntas directrices o específicas**

- ¿Cuáles son los factores que reducen la eficiencia en el proceso de secado de los granos de cacao para el caso de los pequeños productores de la Asociación Juan Pablo II de la Ciudad de Machala?
- ¿Qué materiales debe tener el sistema de secado para cumplir los parámetros de diseño?
- ¿Qué método de secado será el más apropiado para mejorar la calidad del grano de cacao?

## **1.4 Justificación.**

Se enmarca dentro del objetivo 6 del plan nacional de desarrollo 2017-2021 toda una vida que dice:

Desarrollar las capacidades productivas y del entorno para lograr la soberanía alimentaria y el Buen Vivir Rural, debido a que dentro del tema se busca optimizar el proceso de secado del cacao mediante el método por bomba de calor, en las instalaciones del Asociación de Trabajadores Autónomos Agrícolas Juan Pablo II, la cual queda en la Parroquia el Retiro sitio el Recreo de la

Ciudad de Machala, que posee alrededor de 200 hectáreas de terreno e integran 30 socios, de los cuales 10 socios poseen cultivos de cacao, y el método que se utilizan para el secado es el tradicional, en épocas de verano donde la luz solar llega a ser efectiva entre 2 a 3 días por semana, se ve afectado el proceso de secado, y lo que ocurre que el grano de cacao se hace negro, se estima que un 16% se pierde por este motivo, otros socios venden el cacao en baba, pero el precio que pagan en este estado es bajo, es por ello que al ejecutar el tema planteado, se pretende mantener la humedad aconsejada.

El Plan Estratégico de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) establece como una meta en el 2018-2022 en la agroindustria al menos una tecnología para la fermentación y secado para mejorar la formación de precursores de sabor y aroma en cacao, en esto se enmarca el nuevo método de secado por bomba de calor, es por ello que se pretende construir un prototipo, para poder tener un nuevo método de secado, que a la vez utilice otra fuente de energía, en este caso eléctrica, en lugar de energía química derivada de los combustibles que se utiliza actualmente.

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar los parámetros de funcionamiento de una bomba de calor aplicada a una secadora de cacao, cuyos resultados podrán sistematizarse en una propuesta para la construcción de una secadora industrial.

## **1.5 Objetivos de la investigación**

### **1.5.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de sistema de bomba de calor para una secadora de cacao rotativa de flujo constante

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Definir los parámetros técnicos del proceso de secado que inciden en el diseño del sistema de la bomba de calor y de la secadora rotativa.
- Simular y seleccionar los materiales del sistema de secado, que garantice los parámetros técnicos de diseño.

- Realizar pruebas para determinar condiciones operacionales (temperatura, flujo másico, velocidad de aire y su consumo energético), para obtener la humedad mínima aceptable para el mercado distribuidor del cacao.

## 1.6 Hipótesis

### 1.6.1 Hipótesis General

¿El diseño y la construcción de un prototipo de sistema de bomba de calor para una secadora de cacao rotativa de flujo constante, sí seca los granos de cacao con un promedio del 8 % de humedad?

### 1.6.2 Hipótesis Específicas

- ¿Definir las características técnicas del proceso de secado sí permite establecer el tiempo de secado?
- ¿La simulación y selección de los materiales adecuados para la secadora y para la bomba de calor, sí garantiza las características técnicas del diseño?
- ¿Las pruebas del prototipo sí valida el diseño propuesto del sistema de bomba de calor?

### 1.6.3 Identificación de variables

En la tabla 1-1 se muestra las variables identificadas.

**Tabla 1-1:** Identificación de variables

| VARIABLE  | TIPO          | DEFINICION  |
|---|---------------|---|
| Diseño del prototipo                            | Independiente | Es el proceso previo de configuración mental, en la búsqueda de una optimización al secado de cacao, consta de dos etapas el diseño del sistema de bomba de calor y del secador rotativo de flujo constante |
| Construcción del prototipo                      | Independiente | Es la fabricación del prototipo que se basa en el diseño previamente calculado en función de sus características técnicas   |
| Características técnicas del proceso de secado. | Dependiente   | Periodo en el cual los granos de cacao han perdido humedad  |
| Humedad de los granos de cacao                  | Dependiente   | Cantidad de agua, que está presente en la superficie o el interior de los granos de cacao   |
| Materiales                                      | Dependiente   | Conjunto de componentes que se utilizaran para la construcción del prototipo previo diseño.   |
| Tiempo de secado                                | Dependiente   | Cuantificación del tiempo requerido para periodo de secado  |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

### 1.6.4 Operacionalización de Variables

La tabla 2-1 Muestra los indicadores, técnicas e instrumentos utilizados de cada variable.

**Tabla 2-1:** Operacionalización de Variables

| VARIABLE  | INDICADORES   | TECNICAS   | INSTRUMENTOS   |
|---|---|--|--|
| Diseño del prototipo                            | Numero de planos que evidencien el diseño<br>Numero de ecuaciones generadas del diseño  | Diagramas de flujo   | Software CAD y de elementos finitos  |
| Construcción del prototipo                      | Porcentaje de variación entre la humedad obtenida en el diseño y la real.   | Obtención de curvas de humedad teórica y real  | Software de modelado y simulación de procesos<br>Higrómetro  |
| Características técnicas del proceso de secado. | Temperatura de secado<br>Velocidad del aire caliente<br>Consumo de energía de la bomba de calor y de la secadora<br>Flujo másico del refrigerante para la bomba de calor<br>Presión del sistema que requiere la bomba de calor<br>Temperaturas del ciclo de la bomba de calor | Medición y recolección de datos de la temperatura<br>Calculo de la velocidad del aire<br>Medición y recolección de datos del amperaje.<br>Calculo del flujo másico<br>Medición y recolección de datos de la presión<br>Calculo de las temperaturas del ciclo de la bomba de calor. | Termómetros o termocuplas<br>Software para el cálculo de la velocidad del aire requerida<br>Amperímetros para la medican de corriente que consume<br>Software para el cálculo del flujo másico requerido.<br>Manómetros<br>Software para el cálculo de las temperaturas del ciclo de la bomba de calor |
| Humedad de los granos de cacao                  | Porcentaje de humedad aceptable para el mercado distribuidor de cacao   | Medición y recolección de datos de la humedad en los granos de cacao   | Higrómetro   |
| Materiales                                      | Especificaciones técnicas de los componentes  | Observación  | Fichas técnicas de los componentes   |
| Tiempo de secado                                | Porcentaje de reducción del tiempo en comparación con el método de secado tradicional.  | Medición y recolección de datos del tiempo de secado.  | Cronómetro   |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

### 1.6.5 Matriz de consistencia

Tabla 3-1: Matriz de consistencia

| PROBLEMAS   | OBJETIVOS  | HIPOTESIS   | VARIABLES Y SUBVARIABLES  | INDICADORES  | METODOLOGIA TECNICAS   | INSTRUMENTOS   |
|---|--|---|---|--|--|--|
| <b>PROBLEMA GENERAL</b><br><br>¿Cómo optimizar el proceso de secado del cacao y reducir el tiempo empleado, para los pequeños productores de la Asociación de Trabajadores Autónomos Agrícolas Juan Pablo II de la Ciudad de Machala? | <b>OBJETIVO GENERAL</b><br><br>Diseñar y construir un prototipo de sistema de bomba de calor para una secadora de cacao rotativa de flujo constante.                               | <b>HIPOTESIS GENERAL</b><br><br>¿El diseño y la construcción de un prototipo de sistema de bomba de calor para una secadora de cacao rotativa de flujo constante, sí seca los granos de cacao con un promedio del 8 % de humedad? | <b>Variable independiente</b><br><br>Diseño y construcción del prototipo del sistema de bomba de calor para una secadora de cacao | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de planos que evidencien el diseño</li> <li>• Número de ecuaciones generadas del diseño</li> <li>• Porcentaje de variación entre la humedad obtenida en el diseño y la real.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El tipo de investigación es cuasi experimental y el diseño a utilizar va a ser transversal porque se va a estudiar en un momento determinado, el secado de cacao producido en la Asociación</li> <li>• Diagramas de flujo</li> <li>• Obtención de curvas de humedad teórica y real</li> <li>• Medición y recolección de datos de la temperatura</li> <li>• Calculo de la velocidad del aire</li> <li>• Medición y recolección de datos del amperaje.</li> <li>• Calculo del flujo másico</li> <li>• Medición y recolección de datos de la presión</li> <li>• Calculo de las temperaturas del ciclo de la bomba de calor.</li> </ul> | Software CAD y de elementos finitos<br><br>Software de modelado y simulación de procesos<br><br>Higrómetro |
|   |  |   | <b>Variable dependiente</b><br><br>Secado de los granos con un promedio del 8 % de humedad  |  |  |  |
| <b>PROBLEMA ESPECIFICOS</b><br><br>¿Cuáles son los factores que reducen la eficiencia en el proceso de secado de los granos de cacao para el caso de los pequeños productores de la Asociación Juan Pablo II de la Ciudad de Machala? | <b>OBJETIVO ESPECIFICOS</b><br><br>Definir las características técnicas del proceso de secado que inciden en el diseño del sistema de la bomba de calor y de la secadora rotativa. | <b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b><br><br>¿Definir las características técnicas del proceso de secado sí permite establecer el tiempo de secado?  | <b>VARIABLES</b><br><br><b>Variable independiente 1</b><br><br>Las características técnicas que influyen en el proceso de secado  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de secado</li> <li>• Velocidad del aire caliente</li> <li>• Consumo de energía de la bomba de calor y de la secadora</li> <li>• Flujo másico del refrigerante para la bomba de calor</li> <li>• Presión del sistema que requiere la bomba de calor</li> </ul> | • Termómetros o termocuplas<br>• Software para el cálculo de la velocidad del aire requerida<br>• Amperímetros para la medican de corriente que consume<br>• Software para el cálculo del flujo másico requerido.<br>• Manómetros<br>• Software para el cálculo de las   |  |
|   |  |   | <b>Variable dependiente 1</b><br><br>Establecer el tiempo de secado   |  |  |  |

|   |  |   |   |   |   |   |
|---|--|---|---|---|---|---|
|   |  |   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturas del ciclo de la bomba de calor</li> </ul>   | Medición y recolección de datos de la humedad en los granos de cacao. | temperaturas del ciclo de la bomba de calor           |
| ¿Qué materiales debe tener el sistema de secado para cumplir los parámetros de diseño?  | Simular y seleccionar los materiales del sistema de secado, que garantice las características técnicas del diseño  | ¿La simulación y selección de los materiales adecuados para la secadora y para la bomba de calor, si garantiza las características técnicas del diseño? | <b>Variable independiente 2</b><br><br>Simular y seleccionar los materiales adecuados para la secadora y para la bomba de calor | Especificaciones técnicas de los componentes  |   | Medición y recolección de datos del tiempo de secado. |
|   |  |   | <b>Variable dependiente 2</b><br><br>Garantizar las características técnicas del diseño   |   |   |   |
| ¿Qué método de secado será el más apropiado para mejorar la calidad del grano de cacao? | Realizar pruebas para determinar las condiciones operacionales (temperatura, flujo másico, velocidad de aire y su consumo energético), para obtener la humedad mínima aceptable para el mercado distribuidor del cacao | ¿Las pruebas del prototipo sí valida el diseño propuesto del sistema de bomba de calor?   | <b>Variable independiente 3</b><br><br>Realizar las pruebas al prototipo  | Porcentaje de humedad aceptable para el mercado distribuidor de cacao<br><br>Porcentaje de reducción del tiempo en comparación con el método de secado tradicional. | Medición y recolección de datos del tiempo de secado.                 | Higrómetro  |
|   |  |   | <b>Variable dependiente 3</b><br><br>¿Validar el diseño propuesto del sistema de bomba de calor?                                |   |   | Cronómetro  |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del Arte

La producción cacaotera del Ecuador ha aumentado en los últimos años. Varias empresas chocolateras internacionales han mostrado interés en la calidad del cacao de nuestro país, como es el caso de la transnacional Nestlé que, está exportando ocho mil (8000) toneladas anuales. Nestlé se interesó en el producto nacional debido a sus propiedades nutricionales, que permiten cumplir con los requisitos para la elaboración de chocolate de primera calidad. (Teneda Llerena, 2016).

Existen dos opciones para los productores de cacao, comercializarlo fresco o la venta de cacao en seco. Desde el punto de vista del productor el 90% indica que es más rentable venderlo fresco y el restante considera que venderlo seco es más rentable, pero para el mayorista en su totalidad indica que es rentable comprarlo seco (Ullauri Armijos, 2015).

Existen dos métodos para secar el cacao, el secado al sol y el secado artificial, el primero es usado por la mayoría de productores de cacao aproximadamente el 95% según (Nuñez Solano, 2017), y el restante realiza el secado artificial, mediante secadores rotativos a Diesel gas o leña, según (Anecacao, 2016), pero se debe tener cuidado que no adquiera el olor a humo generado en la combustión, durante el proceso de secado. El secado al sol es económico, pero se queda expuesto a las condiciones climáticas, si las condiciones climáticas son buenas el secado se lo realiza en 5 días, pero si no lo son el tiempo aumenta hasta 15 días, otro inconveniente es que se necesita disponer de un espacio físico para el secado, y se expone a que se contamine los granos de cacao. Según (Vásquez Tantas, 2017), entre las ventajas que se destaca del tipo de secado solar es que la temperatura de secado sea moderada y uniforme, su calidad es mejor, su aroma es más fino y su color es más claro.



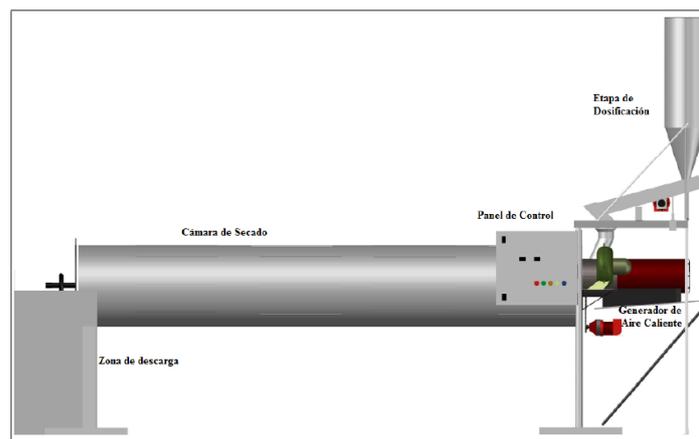
**Figura 1-2:** Secado al sol  
Fuente: Anecacao (2016)

## 2.2 Secado artificial de cacao

A continuación, se indicarán algunos métodos de secado artificial

### 2.2.1 *Secado rotativo de cacao*

En la investigación realizada por (Vega Arnao & Martinez Salazar, 2015) implementaron un sistema rotatorio de flujo constante para el secado de cacao, basándose en la transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo, se regula el flujo de gas GLP para la generación de aire caliente, y a la vez se produce la energía calorífica necesaria para realizar el secado. En este secador se redujo su tiempo a un periodo promedio de 10 horas y el proceso se pudo desarrollar de forma independiente a las condiciones climatológicas de la zona. En la figura 2-2 se muestra el secador que se utilizó para sus experimentaciones y validación matemática.



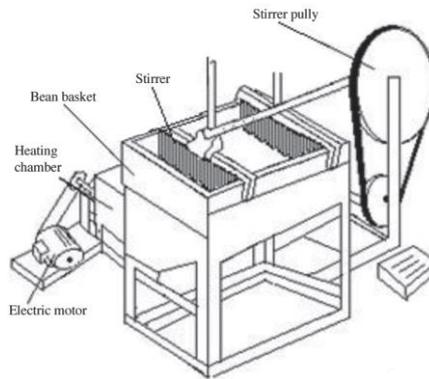
**Figura 2-2:** Esquema del sistema de secado rotativo para cacao  
Fuente: Vega Arnao & Martinez Salazar ( 2015)

### 2.2.2 *Secador tipo batch*

(Chinenye, Ogunlowo, & Olukunle, 2010), realizo la investigación de la cinética del secado del cacao, al mismo tiempo se realizaron experimentos bajo condiciones isotérmicas, usando un secador discontinuo en caliente a 55, 70, y 81 °C. Los datos de humedad obtenidos en el proceso de secado se ajustaron a un modelo de secado de dos capas delgadas con buenos resultados.

El secado fue más rápido a una temperatura de secado mayor. Se utilizó la ley de Fick para predecir la difusividad efectiva usando datos experimentales, asumiendo que la variación de difusividad con la temperatura puede ser expresada por una función tipo Arrhenius. Los valores

de difusividad obtenidos variaron de  $6,137 \times 10^{-10}$  a  $2,1855 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . En la figura 3-2, se muestra el secador empleado en dicho experimento.

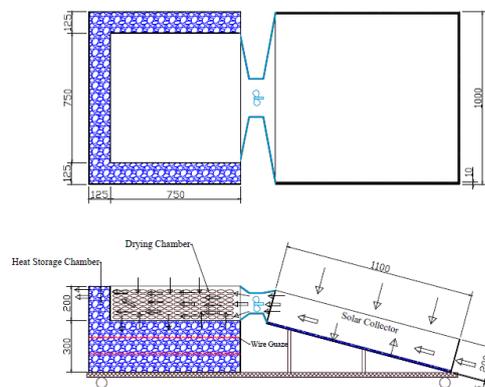


**Figura 3-2:** Secador Tipo Bath  
**Fuente:** Chinenye, Ogunlowo, & Olukunle (2010)

En base al estudio mencionado anteriormente los autores (Komolafe , Adejumo A., Awogbemi , & Adeyeye , 2014), diseñaron un secador batch para 25 kg de cacao, se evaluó utilizando madera como material combustible. El mencionado secador se compone de cuatro partes principales: la plataforma de secado, la cámara de secado, el conducto de calefacción (combustión) y los agujeros de aire. El secado fue exitoso porque se disminuyó la humedad del cacao de 80.01 % a 7.49 % en 7 horas de secado continuo a temperaturas de secado entre 61.3 °C y 66.7 °C. La eficiencia del secado oscilaba entre 72.3 % a 92.9 %. El corto período de secado de los granos de cacao sugirió que este secador es un buen sustituto del método de secado al sol abierto, especialmente cuando la insolación del sol es baja porque no depende del clima.

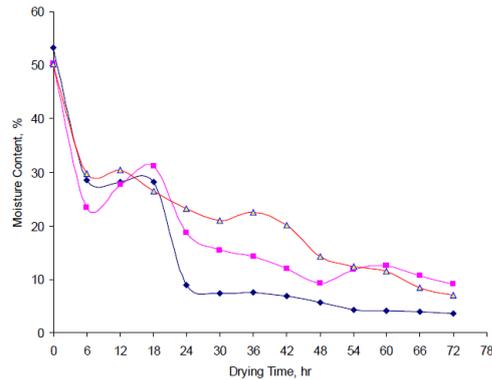
### 2.2.3 *Secadora del tipo solar.*

(Fagunwa, Koya, & Faborode, 2009), desarrollaron un secador solar con almacenamiento de energía térmica para granos de cacao. El secador experimental (ver figura 4-2), tiene tres partes fundamentales, que son: colector solar, cámara de secado y la cámara de almacenamiento térmico.



**Figura 4-2:** Vista en planta y la elevación del sistema solar experimental  
**Fuente:** Fagunwa, Koya, & Faborode ( 2009)

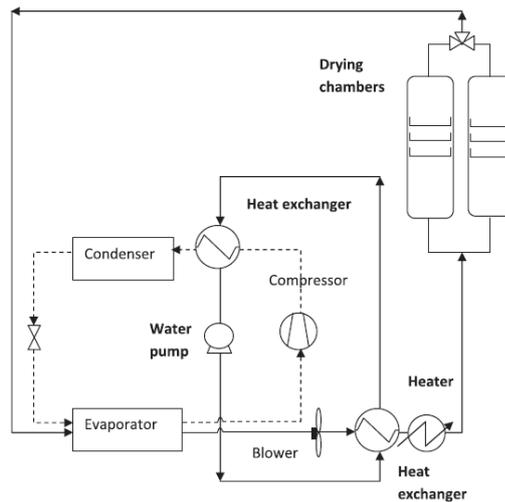
En la figura 5-2, se indica la reducción en el contenido de humedad de los granos de cacao por convección libre y forzada en el secador, donde se determinó que el secado por convección libre, el contenido inicial de humedad en el grano es de 53.4% y disminuyó hasta 3.56% y en el secado por convección forzada con caudales de  $1.02 \text{ m}^3/\text{min}$  y  $1.32 \text{ m}^3/\text{min}$ , la humedad disminuyó a 9.09% y 7.11%, respectivamente. Además (Fagunwa, Koya, & Faborode, 2009), determina que el secado por convección forzada no es beneficioso durante el periodo de descenso de la temperatura del aire desecante.



**Figura 5-2:** Relación entre el tiempo de secado vs porcentaje de humedad  
**Fuente:** Fagunwa, Koya, & Faborode (2009).

#### 2.2.4 Secado por bomba de calor

(Hii, Law, & Law, 2013), estudió la cinética del secado de granos de cacao, mediante un secador de bomba de calor. En la figura 6-2, se muestra el esquema del secador de bomba de calor y la dirección del flujo de aire caliente en el secador. El análisis de transferencia de calor y de masa lo realizaron mediante simulación en 3D. Las ventajas que determinaron con este secador es muy conveniente para mejorar la calidad de los granos de cacao, especialmente, el sabor de cacao. Se secaron 25 kg de granos de cacao de Malasia durante 5 días. Se trabajó con temperaturas de secado por debajo de los  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , para garantizar la calidad del cacao. Esto se hace con el fin de evitar el exceso de ácidos en los granos que son los causantes de la pérdida del sabor.



**Figura 6-2:** Esquema del prototipo de secadora por bomba de calor  
Fuente: (Hii, Law, & Law, 2013)

El secador de bomba de calor se basa en el concepto de refrigeración y en los intercambios de calor con el aire de secado que pasa a través del condensador (calefacción de aire) y el evaporador (refrigeración por aire). Tiene varias ventajas, tales como la capacidad de secar a condiciones de deshumidificador, recuperar el calor latente y sensible de la evaporación del agua, mejorar la calidad del producto (color, textura y apariencia) y lo más importante, la capacidad de conservar calor sensible en los productos.

### 2.3 Propiedades de las pepas de cacao

Para realizar el diseño del secador por bomba de calor es necesario saber las propiedades que posee el material a secar como las siguientes

- a) Densidad real de la pepa de cacao
- b) Densidad al granel
- c) Esfericidad (se asumirá una esfericidad de 1)
- d) Angulo de reposo
- e) Coeficiente de fricción estático.
- f) Propiedades térmicas como el calor específico, la conductividad térmica y la difusividad efectiva de la pepa de cacao.

- **Densidad real**

La densidad de pepa de cacao se determina mediante la aplicación de la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m_c}{V} \quad (1)$$

Dónde:

$\rho$ =Densidad de la pepa de cacao ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$m_c$ = Masa del cacao (Kg)

$V$ = Volumen de la pepa de cacao ( $\text{m}^3$ )

Si bien la fórmula es conocida, se debe considerar que las pepas de cacao no son uniformes, es por ello que según (Plange & Baryeh, 2003), se determina su diámetro geométrico según la siguiente formula:

$$D_g = (W * T * L)^{1/3} \quad (2)$$

Con esta fórmula se puede calcular el volumen de la pepa de cacao, considerándolo como una esfera, con la siguiente formula:

$$V = \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{D_g}{2}\right)^3 \quad (3)$$

Dónde:

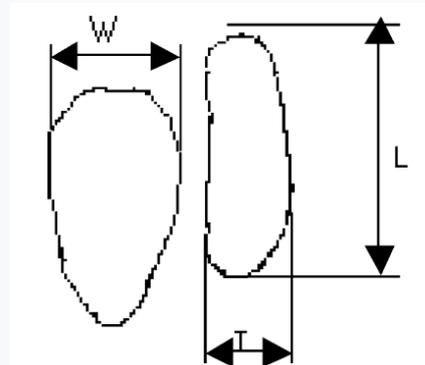
$D_g$ = Diámetro geométrico (m)

$W$ = ancho de la pepa de cacao (m)

$T$ = espesor de la pepa de cacao (m)

$L$ = Largo de la pepa de cacao (m)

La siguiente figura indica la forma y dimensiones de las pepas de cacao.



**Figura 7-2:** Forma y dimensiones de la pepa de cacao

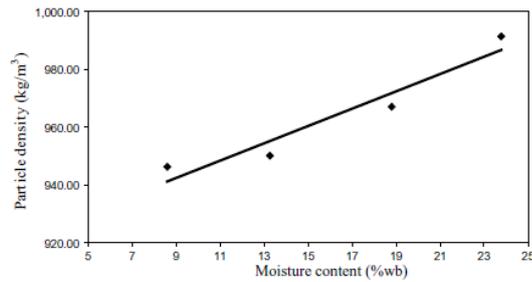
Fuente: (Plange & Baryeh, 2003)

Según (Plange & Baryeh, 2003), la densidad de la pepa de cacao se incrementa linealmente desde  $946,17 \text{ Kg}/\text{m}^3$  a un 8,6% de humedad en base húmeda a  $991,36 \text{ Kg}/\text{m}^3$  a 24 % de humedad en base húmeda. La relación matemática obtenida es la siguiente:

$$\rho = 915,33 + 2,99 M \quad (4)$$

Dónde  $M$ , es el porcentaje de humedad en base húmeda.

La gráfica de la variación de la densidad en función de la humedad en base húmeda es la siguiente:



**Figura 8-2:** Variación de la densidad de la pepa de cacao.

Fuente: (Plange & Baryeh, 2003)

- **Densidad aparente:**

Es la masa de un conjunto de pepas de cacao apiladas, y se obtiene de dividir el peso de un volumen dado del material por el volumen que ocupa. Esta densidad se utilizará para determinar la cantidad de masa presente en una paleta en base al volumen de material, en la misma en un tambor rotativo.

Según (Plange & Baryeh, 2003), la densidad aparente de la pepa de cacao, decrementa linealmente desde 559,60 Kg/m<sup>3</sup> a 505,06 Kg/m<sup>3</sup>, en un rango de humedad del 8,6% al 23,6 24 % de humedad en base húmeda. La relación matemática obtenida es la siguiente:

$$\rho_a = 589,65 - 3,733 M \quad (5)$$

- **Esfericidad**

La esfericidad se refiere a la forma del grano, este valor es igual a 1 para un grano perfectamente esférico. Las pepas de cacao idealizados se los considera como una esfera. Si bien es cierto que estos sólidos no poseen forma redonda, puede resultar válido introducir una aproximación a grano esférico cuando se analiza el problema macroscópicamente. La suposición de grano esférico simplifica el análisis del movimiento según (Duran Oscuez, 2014).

- **Ángulo de reposo.**

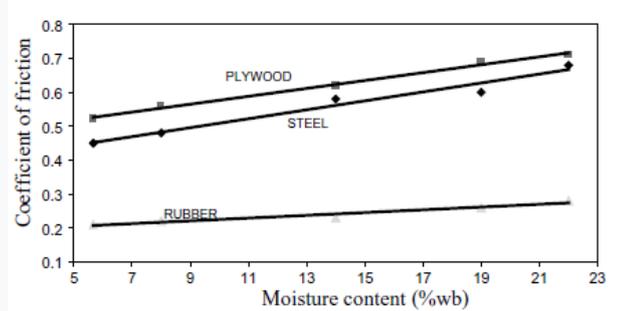
Según el autor (Plange & Baryeh, 2003) el ángulo de reposo y el coeficiente de fricción estática son propiedades físicas que afectan las características de transporte de granos y semillas, y en este estudio se determinó la siguiente fórmula para el ángulo de reposo de vaciado:

$$\theta_e = -0,0508 * M^2 + 1,9507 * M + 14,997 \quad (6)$$

Dónde M representa al porcentaje de humedad en base húmeda, pero en el estudio es válido hasta una humedad del 21%

- **Coefficiente de fricción estático.**

El estudio realizado por (Plange & Baryeh, 2003) , indican la siguiente relación entre el coeficiente de fricción estático, la humedad en base húmeda y el acero



**Figura 9-2:** Contenido de humedad en base húmeda y coeficiente de fricción estático.

Fuente (Plange & Baryeh, 2003)

$$\mu_{steel} = 0,0132 M + 0,373 \quad (7)$$

En la fórmula M representa el porcentaje de humedad de la pepa de cacao en base húmeda, al reemplazar la fórmula por la humedad del 8 % requerida para el cacao da 0,48 y para una humedad del 50 % da 1,03, es necesario saber el coeficiente de fricción estático para analizar el comportamiento en un tambor rotativo en Adams.

- **Propiedades térmicas de la pepa de cacao**

Para la obtención del calor específico, la conductividad térmica y la Difusividad efectiva de las pepas de cacao se utiliza según lo indica (Hii, Law, & Law, 2013):

$$Cp = 0,1569T^2 - 102,51T + 18806 \quad (8)$$

$$k = 2 * 10^{-5}T^2 - 0,0111T + 2,1422 \quad (9)$$

$$Deff = 12 * 10^{-4} * exp\left(\frac{-38000}{Ru T}\right) \quad (10)$$

Dónde:

Cp=Calor específico (J/Kg K)

T= Temperatura en grados Kelvin

k=Conductividad térmica (W/m K)

Deff= Difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s)

Ru= Constante universal de los gases (8,314 J/mol K)

## 2.4 Propiedades del aire húmedo

Como el aire es una mezcla de dos componentes aire seco y agua, se establecen relaciones para determinar sus propiedades psicométricas según (Soto Frances, Sarabia Escriba, Carnero Melero, & Pinazo Ojer, 2018), las fórmulas a usar se indican a continuación:

- a.) Pt (Pascal) Presión total de la mezcla de aire seco y humedad en función de la altura (z)

$$Pt = 101325 * (1 - 2,255692 * 10^{-5} * z)^{5,2561} \quad (11)$$

- b.) Pg (Pascal) Presión de saturación en función de la temperatura del aire de secado (Tg), esta debe estar en grados Kelvin

$$\ln(Pg) = \frac{C1}{Tg} + C2 + C3 * Tg + C4 * Tg^2 + C5 * Tg^3 + C6 * Tg^4 + C7 * \ln Tg \quad (12)$$

Los coeficientes se presentan a continuación y son válidos para  $-0,06 \text{ °C} < T_{ex} < 200 \text{ °C}$

**Tabla 1-2** Coeficientes para determinar la presión de saturación

| C1         | C2      | C3       | C4         | C5            | C6 | C7     |
|------------|---------|----------|------------|---------------|----|--------|
| -5800,2206 | 1,39149 | -0,04864 | 0,00004176 | -0,0000000144 | 0  | 6,5459 |

**Fuente:** (Soto Frances, Sarabia Escriba, Carnero Melero, & Pinazo Ojer, 2018)

**Realizado por:** Carlos Zhigui

- c.) Humedad relativa HR (%) se obtiene de la siguiente formula, en función de la humedad específica (Y), de la presión total de la mezcla (Pt) y de la presión de saturación (Pg)

$$HR = \frac{Y * Pt}{(0,622 + Y) * Pg} \quad (13)$$

- d.) La humedad específica o absoluta (Y) al ingreso de la cámara de secado  $\left(\frac{Kg_{H2O}}{Kg_{as}}\right)$  se obtiene de la siguiente formula

$$Y = 0,62198 * \frac{HR * Pg}{Pt - HR * Pg} \quad (14)$$

- e.) La entalpia de vapor de agua  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$  se determina según la siguiente fórmula, donde la temperatura del aire de secado (Tg) viene dada en grados centígrados.

$$hg = Y * (2500,9 + 1,795 * Tg) \quad (15)$$

- f.) La entalpia total del aire de secado  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$  es el resultado de la suma de la entalpía del aire seco ( $Cpa * Tg$ ), donde Cpa es el calor específico del aire y Tg es la temperatura del aire de secado, más la entalpía de vapor de agua:

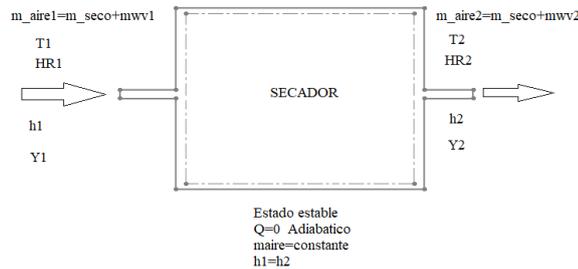
$$h = C_{pa} * T_g + h_g \quad (16)$$

g.) Para la entalpía de vaporización  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$  se utiliza las tablas de (Cengel & Boles, 2011), para obtener una fórmula que varíe en función de su temperatura del producto o del cacao ( $T_p$ ), esto se realiza con los valores de temperatura de secado que varían entre 25 a 50 °C.

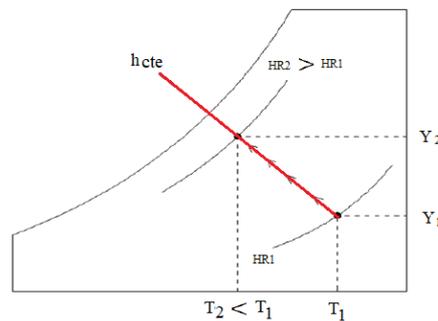
$$h_{fg} = -2,37 * T_p + 2501,6 \quad (17)$$

#### 2.4.1 Psicometría del aire en una cámara de secado

Durante el proceso de secado, el aire cede energía en forma de calor hacia los sólidos, que están a menor temperatura, para producir la evaporación de la humedad superficial. La masa de agua se evapora del producto debido a una diferencia de presiones parciales de vapor y es arrastrada por la corriente de aire, incrementando su humedad absoluta y relativa. Este intercambio neto de energía es cero, ya que la energía que cede el aire por la evaporación es devuelta hacia él en forma de vapor de agua. Esto genera un proceso donde la entalpía de entrada del aire es igual a su entalpía de salida. Las pérdidas de calor hacia el entorno se van a suponer despreciables a pesar de que el cilindro del secador no necesariamente debe estar aislado.



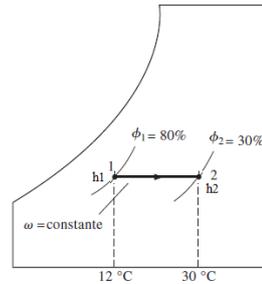
**Figura 10-2** Proceso de secado idealizado  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020



**Figura 11-2** Proceso isoentálpico del aire de secado  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

### 2.4.2 Calentamiento simple

En los sistemas de bomba de calor el aire circula por el condensador, ocasiona que el aire se caliente, la humedad específica permanece constante durante este proceso, sin humidificación, pero la humedad relativa disminuye y su temperatura aumenta. Este proceso se puede ver en la tabla psicométrica, figura 12-2.



**Figura 12-2:** Calentamiento simple  
Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

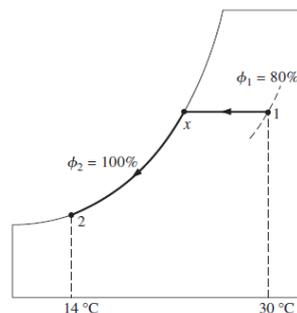
Para calcular el calor transferido se aplica la siguiente formula, si se descarta cualquier trabajo del ventilador que pueda estar presente.

$$Q = \dot{m}_a * (h_2 - h_1) \quad (18)$$

Dónde  $\dot{m}_a$  es el flujo de aire que circula por el ducto,  $h_1$  y  $h_2$  son la entalpias del aire a la entrada y salida de la sección de calentamiento.

### 2.4.3 Enfriamiento con deshumidificación.

Este tipo de enfriamiento ocurre en el evaporador de la bomba de calor, donde primero se produce un enfriamiento simple, es decir la humedad específica permanece constante, su temperatura disminuye y su humedad relativa aumenta, a esta parte se le denomina Calor sensible ( $Q_s$ ). Si el aire en este proceso llega a su punto de rocío (aire saturado), el enfriamiento adicional resulta en la condensación de una parte de la humedad del aire, a esta parte del proceso se denomina Calor latente ( $Q_l$ ), el proceso en la tabla psicométrica se indica en la siguiente figura:



**Figura 13-2:** Enfriamiento con deshumidificación.  
Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

#### 2.4.4 Mezcla adiabática de flujos de aire.

En el mezclado de dos flujos de aire, el intercambio de calor con los alrededores suele ser pequeño y, por lo tanto, puede suponerse que el proceso de mezclado es adiabático. Para este caso las formulas se indican a continuación:

$$hm = \frac{\dot{m}_1 * h_1 + \dot{m}_2 * h_2}{\dot{m}_3} \quad (19)$$

$$rhm = \frac{\dot{m}_1 * rh1 + \dot{m}_2 * rh2}{\dot{m}_3} \quad (20)$$

Dónde:

hm= Entalpía de la mezcla de aire húmedo KJ/Kg

rhm=Humedad relativa de la mezcla

rh1= Humedad relativa que existe en el bypass

rh2= Humedad relativa que existe en la salida del evaporador

$\dot{m}_1$ = Flujo de masa que circula por el bypass Kg/s

$\dot{m}_2$ = Flujo de masa por la entrada del evaporador Kg/s

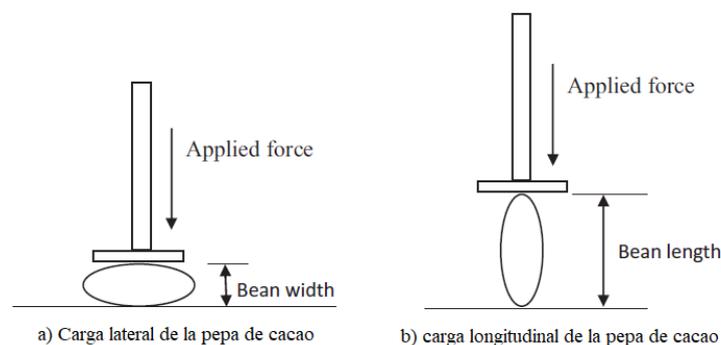
$h_1$ = Entalpía que existe en el bypass KJ/Kg

$h_2$ = Entalpía que existe en la salida del evaporador KJ/Kg

$\dot{m}_3$ = Flujo de masa total.

#### 2.5 Propiedades mecánicas de la pepa de cacao

Para las propiedades mecánicas de las pepas de cacao se basará en el estudio realizado por (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015), en donde indica la fuerza de rotura, el esfuerzo de compresión, la deformación máxima y el Modulo de Elasticidad. Para estos cálculos el autor consideró la carga aplicada de forma vertical y horizontal de las pepas de cacao conforme la siguiente figura:



**Figura 14-2:** Disposición de las pepas de cacao y la fuerza aplicada

Fuente: (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015)

**Tabla 2-2** Fórmulas para determinar las propiedades mecánicas de la pepa de cacao.

| Propiedad mecánica de la pepa de cacao | Formulas determinadas   |
|--|---|
| Fuerza de rotura                       | Fuerza de rotura lado horizontal<br>$Fr=340-11,568*M$ (21)<br>Fuerza de rotura lado vertical<br>$Fr=96,424-3,413*M$ (22)                                      |
| Deformación máxima                     | Deformación lado horizontal<br>$Dm=0,6156-0,0121*M+0,0057*M^2$ (23)<br>Deformación lado vertical<br>$Dm=0,05420+0,0519*M+0,0050*M^2$ (24)                     |
| Esfuerzo de compresión                 | Compresión lado horizontal<br>$\sigma_c=2,204-0,1148*M+0,0018*M^2$ (25)<br>Compresión lado vertical<br>$\sigma_c =0,6446-0,0372*M+0,0007*M^2$ (26)            |
| Módulo de Elasticidad                  | Módulo de Elasticidad lado horizontal<br>$E=52,7209-4,9531*M+0,1232*M^2$ (27)<br>Módulo de Elasticidad lado vertical<br>$E =10,7543-1,0427*M+0,0265*M^2$ (28) |

**Fuente:** (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015)

**Realizado por:** Carlos Zhigui

De la tabla expuesta se determina que la máxima fuerza de rotura cuando el cacao posee una humedad en base húmeda del 8%, es de 247 Newton, en el lado horizontal, para el lado vertical es de 69 Newton. La deformación es de 0,81 mm, en el lado horizontal y en el lado vertical es de 0,79 mm. El esfuerzo de compresión en el lado horizontal es de 1,4 MPa y en el lado vertical es de 0,39 MPa. El Modulo de Elasticidad en el lado horizontal es de 21 MPa y en el lado vertical es de 4 MPa.

### 2.5.1 Rigidez de contacto

Para determinar el coeficiente de rigidez de contacto, se usa la teoría de la mecánica de contacto de Hertz y la teoría del impacto de la física clásica.

La fórmula para determinar el coeficiente de rigidez de contacto es la siguiente, según (Giesbers, 2012)

$$K = 2 * \left( \frac{3 * F * R}{4 * E^*} \right)^{\frac{1}{3}} * E^* \quad (29)$$

Dónde  $E^*$  es el módulo de elasticidad para el contacto en pascuales,  $R$  es el radio efectivo en metros, pero como se considera un contacto entre esfera y plano, el valor de  $R$  representa al radio equivalente de la esfera y  $F$  es la fuerza ejercida en el contacto.

### 2.5.2 *Módulo de Elasticidad de contacto.*

Para determinar el módulo de elasticidad de contacto se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} * \left( \frac{1 - \nu_c^2}{E_c} + \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} \right) \quad (30)$$

Dónde  $E_c$  y  $E_a$  representan al módulo de elasticidad del cacao y del acero,  $\nu_c$  y  $\nu_a$  representan el coeficiente de Poisson del cacao y del acero respectivamente. Para el coeficiente de Poisson del cacao se utiliza un valor de 0,3; esto se basó según (Faborode & Dinrifo, 1994), para el coeficiente de poisson del acero se utiliza de 0,265.

### 2.5.3 *Impacto inelástico*

Para determinar la fuerza ejercida en el impacto se utiliza la conservación de la energía, considerando caída libre, con una velocidad inicial de cero, con esto determina a velocidad final en el impacto la cual se representa por la siguiente formula, no se considera la resistencia ejercida por el aire.

$$Ec_1 + Ep_1 = Ec_2 + Ep_2 \quad (31)$$

La fórmula anterior representa la conservación de la energía cinética ( $E_c$ ) y la energía potencial ( $E_p$ ), los subíndices 1 y 2 representan al estado inicial y final respectivamente, como la pepa de cacao cae libremente y con una velocidad inicial de cero, por ende, la energía cinética inicial es también cero y solo existe la energía potencial. Al final justo antes del impacto toda la energía potencial se convierte en energía cinética, por ello la velocidad de impacto queda de la siguiente forma:

$$V = \sqrt{2 * g * h_1} \quad (32)$$

Dónde  $V$  representa la velocidad antes del impacto,  $h_1$  es la altura desde donde se lanza la pepa de cacao y  $g$  es el valor de la gravedad, Con estos valores no es suficiente determinar la fuerza de impacto, para ello se necesita medir la distancia a la que rebota la pepa de cacao. Para esto se utiliza otra vez la ecuación de la conservación de la energía y se aplica la fórmula para una colisión en línea recta

$$F_{imp} * d_{reb} = \Delta E_c \quad (33)$$

Dónde  $F_{imp}$ , es la fuerza de impacto,  $d_{reb}$  es la distancia de rebote y  $\Delta E_c$  es el cambio en la energía cinética.

## 2.6 Humedad de equilibrio

El contenido de humedad, es decir, la cantidad de agua contenida en el grano, se puede expresar tanto en base húmeda (M), como en base seca (X). Estas humedades, se definen respectivamente con las ecuaciones 34 y 35: donde ms es la masa de la materia seca y mt es la masa total de la pepa de cacao.

$$M = \frac{mt - ms}{mt} \quad (34)$$

$$X = \frac{mt - ms}{ms} \quad (35)$$

Cuando el contenido de humedad del cacao, no intercambia vapor de agua con la atmosfera que lo rodea, se dice que el producto está en equilibrio con el aire que lo rodea. Según (Villamar de Borrero & Hernandez H.), la fórmula para determinar la humedad de equilibrio del cacao es la siguiente:

$$Xe = (0,0109 + 0,238 * HR - 0,638 * HR^2 + 0,562 * HR^3) * \exp^{((0,029 - 0,335 * HR + 0,958 * HR^2 - 1,272 * HR^3 + 0,574 * HR^4) * (T - 57,291))} \quad (36)$$

Al aplicar la formula y considerar la temperatura promedio de la Ciudad de Machala de 25 °C y una humedad relativa del 50%, se obtiene una humedad de equilibrio en base húmeda del 8%, lo que representa en 9% en base seca. También existe la sugerencia de utilizar una humedad de equilibrio del 7% en base seca según (Hii, Law, & Law, 2013). Como existe dos criterios según los autores citados se va a optar por humedad de equilibrio del 8% en base seca.

## 2.7 Modelo matemático del secado de cacao.

El modelo de secado se fundamenta en la teoría de transferencia de calor y masa. Según (Hii, Law, & Law, 2013), la ecuación de la transferencia de masa está basada en la segunda Ley de Fick que establece:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla * (Deff \nabla X) \quad (37)$$

Dónde

Deff =Difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/seg)

X =Contenido de humedad del producto en base seca  $\left( \frac{Kg_{H2O}}{Kg_{solidos\ secos}} \right)$

t =Tiempo (segundos)

La ecuación 37 describe el cambio de humedad por unidad de tiempo dentro del producto. Se lo va utilizar para fines de diseño en los casos que el mecanismo de control de secado es la difusión de la humedad.

La transferencia de calor se basa en la ecuación de conducción de calor de Fourier:

$$\rho * Cp \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla * (k \nabla T) \quad (38)$$

Dónde:

$\rho$ = Densidad del producto (Kg/m<sup>3</sup>)

$Cp$ =Calor específico (J/Kg K)

$T$ = Temperatura en grados Kelvin

$k$ =Conductividad térmica (W/m K)

Para la transferencia de calor y masa de las pepas de cacao se las va a considerar una geometría unidimensional en coordenadas esféricas, también se le van a asignar condiciones de frontera, según (Koua, Ekoun Koffi, & Gbaha, 2019) y (Perussello, Mariani, & Camargo do Amarante, 2012).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{Deff}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \rightarrow \frac{\partial X}{\partial t} = Deff \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (39)$$

El contenido de humedad depende de las condiciones iniciales de frontera en la superficie y en el centro de la pepa de cacao, y se establece de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (40)$$

$$-Deff \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} = hmc(X - Xe) \quad (41)$$

Dónde:

$hmc$ =Coeficiente de transferencia de masa (m/s)

$Xe$ =Humedad de equilibrio en base seca  $\left( \frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{solidos\ secos}} \right)$

Para la transferencia de calor se le asigna las siguientes condiciones de contorno a la ecuación de calor de Fourier según (Zabalaga Davila, 2016)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho * Cp * r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho * Cp} \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (42)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (43)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = ht(Tp - Ta) + hfg * Def f * \rho * \frac{\partial X}{\partial r} \quad (44)$$

Dónde:

ht=Coeficiente de transferencia de calor  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

Tp=Temperatura del producto (Kelvin)

Ta= Temperatura del aire (Kelvin)

hfg= Entalpía de vaporización (J/Kg)

$\rho$ = Densidad del producto (Kg/m<sup>3</sup>)

Para resolver las ecuaciones diferenciales parciales planteadas, para la transferencia de calor y masa, se va a recurrir a los métodos numéricos, mediante la técnica de diferencias finitas, utilizando el método de Crank –Nicolson, el cual ofrece un esquema implícito alterno que tiene una precisión de segundo orden, tanto para el espacio como para el tiempo. Para alcanzar tal precisión, se desarrollan aproximaciones por diferencias en el punto medio del incremento del tiempo, según (Chapra & Canale, 2015), la ecuación de la primera derivada temporal se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (45)$$

La segunda derivada en el espacio puede determinarse en el punto medio promediando las aproximaciones por diferencias al principio ( $t^j$ ) y al final ( $t^{j+1}$ ) del incremento del tiempo y se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} \right) \quad (46)$$

### 2.7.1 Fórmulas de los coeficientes de transferencia de calor y masa

Los coeficientes de transferencia de calor (ht) y masa (hmc) son estimados por la siguiente correlación según (Hii, Law, & Law, 2013):

$$Nu = 2 + 0,552Re^{0,53}Pr^{1/3} \quad (47)$$

$$Sh = 2 + 0,552Re^{0,53}Sc^{1/3} \quad (48)$$

Dónde Nu, Sh, Re, Pr y Sc son parámetros adimensionales conocidos como Nusselt, Sherwood, Reynolds, Prandtl y Schmidt

Reynolds es calculado de acuerdo a (Cengel Y. A., 2007)

$$Re = \frac{\rho_{\infty} * V_{\infty} * Dg}{\mu_{\infty}} \quad (49)$$

Dónde:

$\mu_{\infty}$  = Viscosidad del aire de secado (Pa.s)

$V_{\infty}$  = Velocidad del aire de secado (m/s)

$\rho_{\infty}$  = Densidad del aire de secado (Kg/m<sup>3</sup>)

Dg= Diámetro geométrico de la pepa de cacao

El número de Prandtl será obtenido de (Cengel Y. A., 2007), en función de la temperatura media de secado la cual es de 25°C hasta la máxima de 45°C, con este dato el número de Prandtl es de 0,726.

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor (ht) se utiliza a siguiente formula:

$$ht = \frac{Nu * k_{\infty}}{Dg} \quad (50)$$

Dónde:

$k_{\infty}$ =Conductividad térmica del aire de secado (W/m K)

Para calcular el coeficiente de transferencia de masa (hmc) y el número de Schmidt (Sc) se utiliza la fórmula según (Cengel Y. A., 2007):

$$hm = \frac{Sh * Deff}{Dg} \quad (51)$$

$$Sc = \frac{\mu_{\infty}}{Deff * \rho_{\infty}} \quad (52)$$

## 2.8 Balance de masa y energía en un secador

A continuación, se plantean las fórmulas a utilizar para aplicar la conservación de la masa y energía dentro de un secador.

### 2.8.1 Balance de masa

El objetivo principal de realizar el análisis termodinámico de la conservación de la masa en el secador considerando la humedad de aire de secado, es obtener el caudal de aire necesario, y sus propiedades, para determinadas condiciones de secado. Adicionalmente, se pueden derivar otros parámetros como la cantidad de agua a evaporar, el calor total de vaporización, la energía requerida para calentar el aire.

El flujo de cacao a obtener  $\dot{m}_p$ , es la suma del flujo de agua que se evapora del cacao  $\dot{m}_a$  y el flujo de cacao seco  $\dot{m}_s$

$$\dot{m}_p = \dot{m}_a + \dot{m}_s \quad (53)$$

El flujo de agua a evaporar es igual a:

$$\dot{m}_a = X * \dot{m}_s \quad (54)$$

De la figura 10-2 se puede realizar un balance del agua en la etapa de secado lo cual queda la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \dot{m}_s * X_1 + G * Y_1 &= \dot{m}_s * X_2 + G * Y_2 \\ Y_2 &= \frac{\dot{m}_s * (X_1 - X_2) + G * Y_1}{G} \end{aligned} \quad (55)$$

Dónde:

$Y_2$ = Humedad absoluta a la salida del volumen de control  $\left(\frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{gas}}\right)$

$\dot{m}_s$ = Flujo de cacao seco (Kg/s)

$X_2$ = Humedad en base seca a la salida del volumen de control  $\frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{solidos\ secos}}$

$G$ = Flujo de aire de secado (Kg/s)

$Y_1$ = Humedad absoluta a la entrada del volumen de control  $\left(\frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{gas}}\right)$

$X_1$ = Humedad en base seca a la entrada del volumen de control  $\frac{Kg_{H_2O}}{Kg_{solidos\ secos}}$

### 2.8.2 Balance de energía en un secador

El flujo de calor entre el aire de secado y la pepa de cacao ( $Q_p$ ) se establece con la siguiente fórmula según (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018):

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (56)$$

A continuación, se detalla cada flujo de calor que interviene en el flujo total

- a.) El Flujo de calor utilizado para calentar el agua contenida dentro de la pepa de cacao ( $Q_1$ ) desde la temperatura de entrada del producto ( $T_{p_j}$ ) hasta la temperatura de saturación del vapor ( $T_g$ ) y el flujo de calor utilizado para calentar el agua que permanece dentro de la pepa de cacao (que no se evapora) desde la temperatura de saturación del vapor ( $T_g$ ) hasta la temperatura de salida del material ( $T_{p_{j+1}}$ )

$$Q_1 + Q_3 = \dot{m}_s * X_2 * (h_{s2} - h_{s1}) \quad (57)$$

- b.) El flujo de calor utilizado para vaporizar el agua que abandona la pepa de cacao

$$Q_2 = \dot{m}_s * h_{fg} * (X_1 - X_2) \quad (58)$$

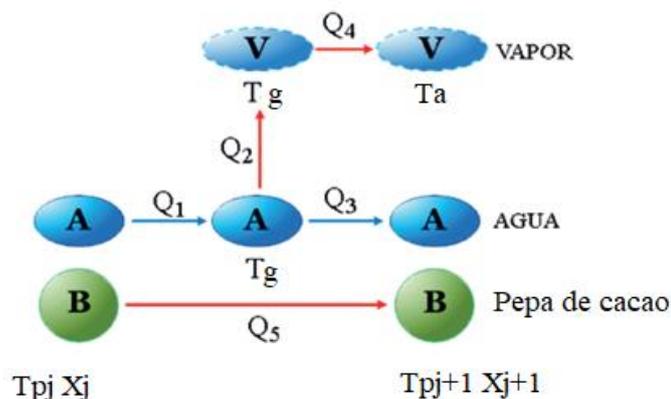
- c.) Flujo de calor utilizado para calentar el vapor de agua que abandona el material desde la temperatura saturación del vapor ( $T_g$ ) hasta la temperatura del aire de secado ( $T_a$ ).

$$Q_4 = \dot{m}_s * (X_1 - X_2) * (h_{p2} - h_g) \quad (59)$$

- d.) El flujo de calor utilizado para calentar las pepas de cacao seco desde la temperatura de ingreso ( $T_{p1}$ ) hasta su temperatura de salida del volumen de control ( $T_{p2}$ ).

$$Q_5 = \dot{m}_s * C_p * (T_{p2} - T_{p1}) \quad (60)$$

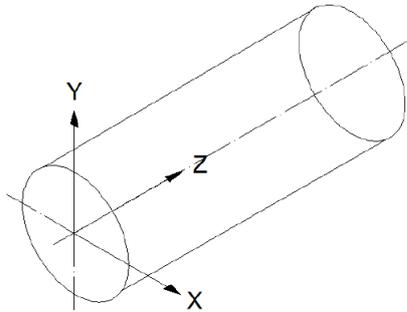
El autor (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018), en este estudio indica que los flujos de calor  $Q_1$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  y  $Q_5$  son con frecuencia mucho menores que el flujo de calor utilizado para vaporizar el agua que abandona la biomasa ( $Q_2$ ).



**Figura 15-2:** Transferencia de calor en el proceso de secado  
Fuente: (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018)

## 2.9 Movimiento de los sólidos en el secador

Para abordar el diseño mecánico del secador rotativo se analiza el movimiento que van a tener las pepas de cacao dentro del mismo, para ello se utiliza un eje coordenado, tal como lo indica la figura 16-2.

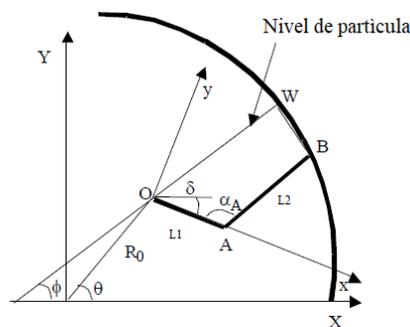


**Figura 16-2:** Sistemas coordenadas del secador rotativo  
Fuente: (Duran Oscuez, 2014)

Se analizará el movimiento en el plano XY, donde las pepas de cacao son recogidas por los elevadores y luego arrojados para formar una cascada de sólidos. Para ello, se utilizará una metodología geométrica que fue desarrollada por (Duran Oscuez, 2014) y (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007).

### 2.9.1 Caída de las pepas de cacao desde los elevadores.

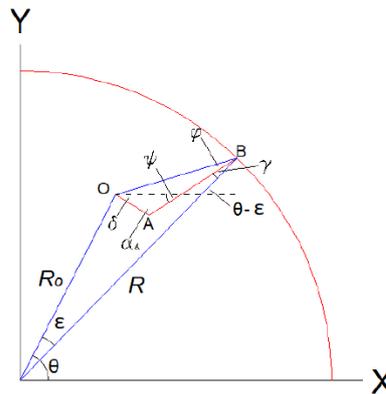
Desde la parte inferior del tambor rotativo, las paletas recogen cierta cantidad de cacao al inicio es máxima, y luego va disminuyendo a medida que el material cae desde los elevadores por gravedad. La capa superior de material forma con la horizontal un ángulo que depende del volumen de material presente en las paletas, a este ángulo se denomina ángulo de reposo. Sin embargo, se lo denomina ángulo dinámico de reposo debido a que el marco de referencia (tambor) está en movimiento (Duran Oscuez, 2014).



**Figura 17-2:** Esquema de los elevadores de dos segmentos  
Fuente: (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007)

La figura 17-2 es un esquema donde se definen algunas de las variables a utilizarse en el método geométrico para determinar la altura promedio y el ángulo de caída promedio. En este caso, se analizará con un elevador de dos segmentos paralela al eje longitudinal del tambor.

Se representa en la figura 18-2 un elevador con elevador de dimensiones arbitrarias, dadas por la longitud del labio L1, y la longitud de la paleta, L2. El ángulo formado entre estos dos segmentos es  $\alpha_A$ . El segmento L2 no necesariamente está radialmente alineado con el centro del tambor. En este caso (Duran Oscuez, 2014), supone que las paletas son paralelas al eje longitudinal del tambor.



**Figura 18-2:** Parámetros para determinar  $R_o$  y  $\delta$   
Fuente: (Duran Oscuez, 2014)

Los autores (Duran Oscuez, 2014) y (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007) proponen unas fórmulas que serán usadas en este proyecto a continuación se las describen:

$$\overline{OB} = \sqrt{L1^2 + L2^2 - 2 * L1 * L2 * \cos \alpha_A} \quad (61)$$

Dónde L1 son las longitudes del labio y L2 las longitudes de la paleta

Entonces:

$$R_o = \sqrt{\overline{OB}^2 + R^2 - 2 * \overline{OB} * R * \cos(\gamma + \varphi)} \quad (62)$$

Por otro lado

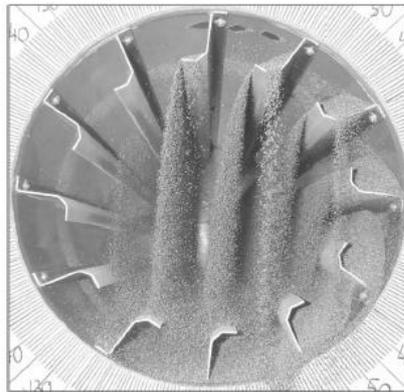
$$\epsilon = \cos^{-1} \left( \frac{R_o^2 + R^2 - \overline{OB}^2}{2 * R_o * R} \right) \quad (63)$$

El ángulo representa el desfase instantáneo  $\delta$  entre los sistemas de coordenadas global y local, medido con respecto a la horizontal es:

$$\delta = \pi + \epsilon + \gamma - \alpha_A - \theta \quad (64)$$

Los ángulos  $\alpha_A$  y  $\gamma$  serán los ángulos que se variara para determinar la masa contenida en cada elevador.

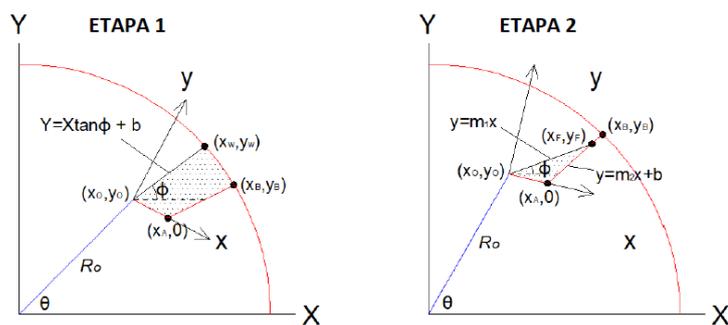
Las fórmulas establecidas pretenden simular el comportamiento de las pepas de cacao dentro del secador rotativo, tal como se indica en la figura 19-2.



**Figura 19-2:** Sólidos en cascada dentro del secador rotativo  
Fuente: (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007)

Mientras se produce el vaciado, existe un momento en que esta capa de sólidos deja de hacer contacto con la pared del tambor, y solamente toca a la paleta. En este punto, se diferencian dos etapas del vaciado:

- 1.) Material en contacto con paleta y tambor
- 2.) Material en contacto solo con paleta



**Figura 20-2:** Etapas del vaciado  
Fuente: (Duran Oscuez, 2014)

En este punto se establece las coordenadas de los puntos para el caso 1

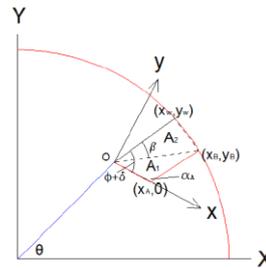
$$\begin{aligned}
 X_A &= L1 ; y_A = 0 \\
 x_B &= L1 - L2 * \cos \alpha_A \\
 x_B &= L2 * \sin \alpha_A
 \end{aligned}$$

$$Y_w = R_o * \sin\theta + y_w * \cos\delta - x_w * \sin\delta \quad (65)$$

$$X_w = R_o * \cos\theta + x_w * \cos\delta - y_w * \sin\delta \quad (66)$$

Al resolver las ecuaciones 65 y 66 de manera simultánea, se obtienen las coordenadas del punto  $(x_w, y_w)$

Con las coordenadas de los puntos se determina el área contenida por los elevadores:



**Figura 21-2:** Áreas de las paletas- Caso 1

Fuente: (Duran Oscuez, 2014)

$$y \geq y_B \approx \phi + \delta \geq \tan^{-1} \left( \frac{y_B}{x_B} \right)$$

$$A_1 = \frac{1}{2} * L1 * L2 * \sin\alpha_A \quad (67)$$

Para determinar el área 2 se usa la siguiente fórmula:

$$\overline{OB} = \sqrt{x_B^2 + y_B^2}$$

$$\overline{OW} = \sqrt{x_w^2 + y_w^2}$$

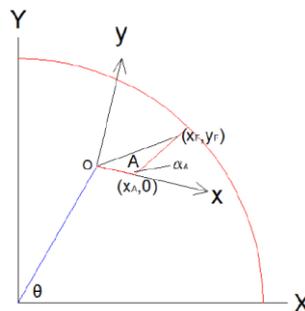
$$A_2 = \frac{1}{2} * \overline{OB} * \overline{OW} * \sin\alpha_A \quad (68)$$

Para el caso 2:

$$y_1 = m_1 x = x * \tan(\phi + \delta)$$

$$y_2 = m_2 x + b = -\tan\alpha_A(x - L1)$$

La intersección de estas dos rectas determina las coordenadas del punto  $(x_f, y_f)$



**Figura 22-2:** Áreas de las paletas- Caso 2

Fuente: (Duran Oscuez, 2014)

$$y < y_B \equiv \emptyset + \delta < \tan^{-1} \left( \frac{y_B}{x_B} \right)$$

$$\overline{AF} = \sqrt{(x_F - L1)^2 + y_F^2}$$

$$A = \frac{1}{2} * \overline{AF} * \sin \alpha_A \quad (69)$$

Cuando  $y=0$ , que es equivalente a  $\emptyset + \delta = 0$ , la paleta está completamente vacía y, por lo tanto, el área será igual a cero. Como siempre  $\emptyset$  es mayor o igual que cero, entonces debe existir un instante del movimiento en el que el ángulo  $\delta$  cambia de signo positivo a negativo. Esto ocurre cuando la paleta está completamente horizontal, alineado con el eje X de las coordenadas globales.

Lo indicado hasta el momento ocurre en el plano x-y, para obtener el área de producto que ocupa cada paleta en función de su ángulo de posición  $\theta$ , como se posee la longitud de cada paleta del tambor en el eje Z, se puede obtener el volumen que ocupa cada paleta, por lo tanto la formula se expresa de la siguiente forma:

$$V = A(\theta) * Lp \quad (70)$$

La masa total de cacao que podrá ser arrastrada por las paletas es igual a

$$m(\theta) = \frac{A(\theta)*Lp}{Vp} * \rho_a * nf \quad (71)$$

Dónde  $nf$  es el número de paletas que posee el tambor rotativo,  $\rho_a$  es la densidad al granel o aparente, además con la fórmula anterior es posible determinar la masa de material (pepas de cacao) presente en las paletas en función de la posición angular del secador rotativo.

### 2.9.2 Ángulo representativo y altura de caída promedio

Para determinar el ángulo representativo de toda la caída de material durante un ciclo o revolución de paleta se analiza según (Duran Oscuez, 2014), que utiliza el teorema del valor medio para integrales. Este teorema establece que, si una función es continua en un intervalo cerrado, entonces existe un punto en rango del intervalo tal que la integral (área bajo la curva) es igual a la diferencia entre los valores extremos del intervalo multiplicado por la función evaluada en el valor interior, cuya fórmula es:

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{m_0} \theta \, dm}{m_0} = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^n \theta_i (m_i - m_{i-1}) \quad (72)$$

Con la fórmula anterior se puede determinar la altura de caída promedio correspondiente a este ángulo medio:

$$\bar{Y} = Ro * \sin \bar{\theta} + \sqrt{R^2 - (Ro * \cos \bar{\theta})^2} \quad (73)$$

Esta altura promedio de caída es importante porque permite establecer la energía cinética promedio a la que va a estar sometida la pepa de cacao cuando choque con el fondo del tambor rotativo.

### 2.9.3 Restricciones geométricas de los secadores rotativos.

Para el diseño de los secadores rotativos se deben considerar las siguientes restricciones geométricas según (Mujumbar, 2006).

$$RG1 \left( 5\% < \frac{H}{Vc} < 15\% \right) \quad (74)$$

$$RG2 \left( 5 < \frac{nf}{D} < 10 \right) \quad (75)$$

Dónde RG1, RG2 corresponden a las siglas de restricción geométrica 1 y 2 respectivamente, H representa al volumen de las pepas de cacao contenido en el tambor, Vc es el volumen del cilindro rotativo o tambor rotativo, D es el diámetro del tambor y nf es el número de paletas que posee el tambor.

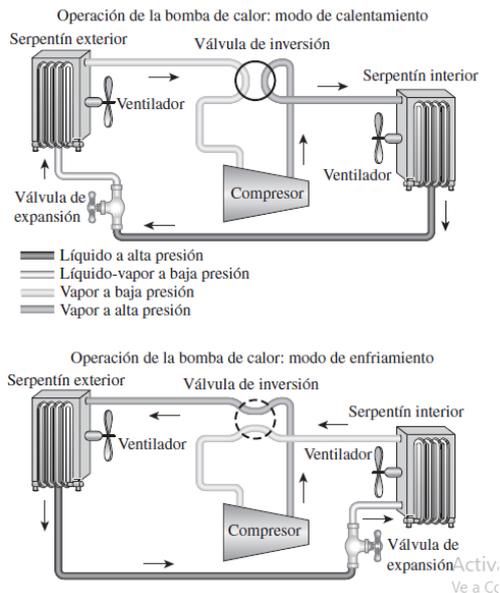
Para determinar el volumen de cilindro rotativo (H) se utiliza la siguiente formula según (Mujumbar, 2006)

$$H = \frac{1}{2} * (nf + 1) * A(\theta) * Lp \quad (76)$$

## 2.10 Sistema de la bomba de calor

Según (Cengel & Boles, 2011), las bombas de calor generalmente resultan más costosas que otros sistemas de generación de aire caliente cuando se adquieren y se instalan, pero a la larga ahorran dinero porque reducen su costo. A pesar de sus costos iniciales altos, cada vez la popularidad de las bombas de calor va en aumento.

Las bombas de calor y los aires acondicionados tienen los mismos componentes mecánicos, por ende, el mismo sistema aire acondicionado se lo puede utilizar para la generación de aire caliente, esto se consigue al invertir el ciclo, como se muestra en la siguiente figura.

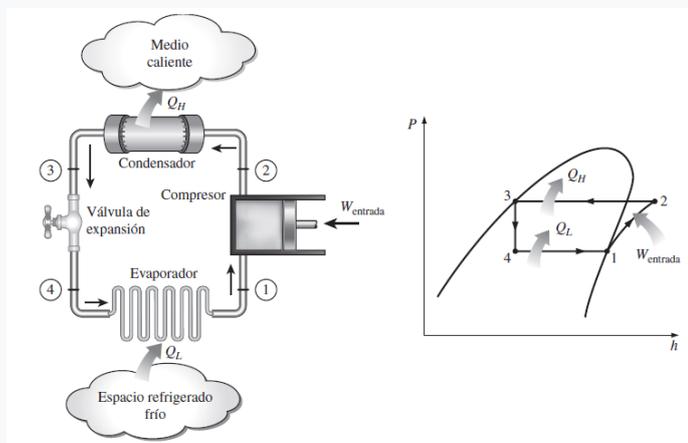


**Figura 23-2:** Bomba de calor en modo calentamiento y enfriamiento  
**Fuente:** (Cengel & Boles, 2011)

### 2.10.1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El diseño de la bomba de calor se basa principalmente en la aplicación del ciclo de compresión mecánica de vapor, engloba tanto un evaporador como un condensador. Estos están definidos mediante el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, que consiste en forzar la circulación del refrigerante a través de un circuito cerrado que se divide en dos zonas:

- Zona de baja presión: donde el fluido refrigerante absorbe calor del ambiente en el evaporador.
- Zona de alta presión: el fluido cede calor al ambiente, en el condensador



**Figura 24-2:** Esquema y diagrama P-h para el ciclo de refrigeración  
**Fuente:** (Cengel & Boles, 2011)

- **Descripción del ciclo.**

Un fluido refrigerante circula por dentro de los conductos de la máquina frigorífica por compresión de vapor. Éste refrigerante entra al compresor en estado gaseoso, donde se eleva su presión y por tanto su temperatura en un proceso isentrópico, hasta alcanzar la presión de condensación, punto 1 al 2.

A continuación, el fluido ingresa al condensador, que es el elemento encargado de pasar el fluido a estado líquido a la vez que cede calor a su entorno por el cambio de fase que se tiene lugar en él. El fluido sale del condensador totalmente en estado líquido. Este cambio tiene lugar en una línea de presión constante y en el sentido de disminución de la entalpía del fluido, por lo que se representa en el diagrama con una recta del punto 2 al 3.

El tramo del ciclo que se inicia en el punto 1 al 3 se conoce como el tramo de alta presión, que finaliza cuando el refrigerante alcanza la válvula de expansión. Éste tramo de alta presión se puede considerar isotérmico debido a que el refrigerante no varía su temperatura durante el cambio de estado.

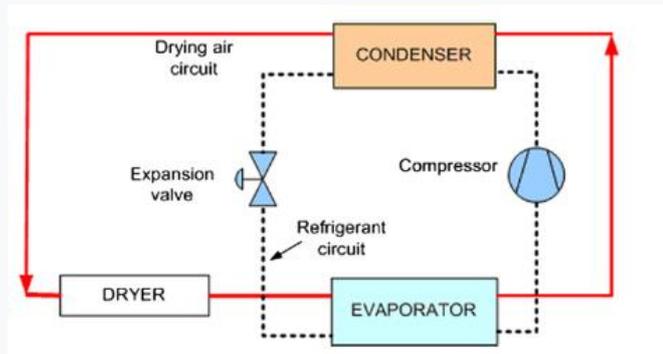
En la válvula de expansión se produce una caída de la temperatura y de la presión sin intercambio de calor y a entalpía constante. Este proceso adiabático e isoentálpico es el que se lleva a cabo entre el punto 3 al 4.

El refrigerante sale de la válvula de expansión en estado líquido y a la presión de evaporación para a continuación ingresar al evaporador. El refrigerante cambia de estado líquido a estado vapor, absorbiendo el calor latente necesario para realizar el cambio de fase del entorno en el que se encuentra y de esa manera enfriando el fluido en el que está sumergido. Éste tramo se corresponde en el diagrama con la línea que va del punto 4 al 1. El refrigerante sale del evaporador en estado gaseoso listo para entrar de nuevo al compresor y volver a empezar el ciclo.

Según la información recopilada por (Mineá, 2013), indica que los sistemas que integran secadoras y bombas de calor son mucho más complejas que cada uno de estos componentes por separado. Por lo tanto, no deben ser analizados independientemente debido a la compleja interacción entre el aire de secado y la bomba de calor (refrigerante). Mientras que los fundamentos del proceso de secado (es decir, teorías de transferencia de calor y masa) y la termodinámica de la bomba de calor son conocidos, las interacciones entre estos dos sistemas termodinámicos requieren un cuidadoso enfoque teórico y experimentales.

### 2.10.2 Representación esquemática del principio de secado por bomba de calor

Según (Minea, 2013) el dibujo esquemático de la figura 25-2 sugiere que el mismo aire de secado fluya a través del evaporador y el condensador de la bomba de calor. El problema en este caso es que la capacidad de deshumidificación de la bomba y la humedad relativa del proceso del aire que ingresa a la cámara de secado no se puede controlar de manera eficiente.



**Figura 25-2** Representación esquemática del principio de secado por bomba de calor.  
**Fuente:** (Minea, 2013)

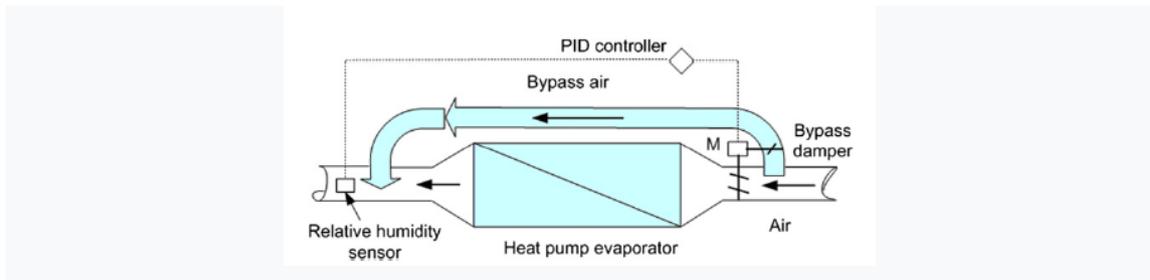
En general, para propósitos de diseño económico y un control eficiente de deshumidificación, el flujo de aire de secado que pasa por el condensador tiene que ser más alto que la que pasa por el evaporador. La ubicación física del condensador con respecto al evaporador es muy importante, especialmente para bombas de calor de secado compacto. En este caso es necesario controlar la capacidad de deshumidificación de la bomba de calor para que coincida continuamente con la tasa de deshidratación de humedad del material.

### 2.10.3 Control de deshumidificación del aire de secado.

Según (Minea, 2013) el proceso de deshidratación térmica es complejo porque depende del tipo de producto, para este caso de estudio es el cacao, su masa inicial, temperatura y contenido de humedad.

Generalmente se requiere una masa adecuada de producto seco para proporcionar suficiente humedad y una tasa de drenaje suficiente durante el ciclo de secado. Existen varias soluciones para controlar la tasa de deshumidificación de la bomba de calor, se explican dos de los métodos investigados:

a.) Operar el sistema con una derivación del evaporador, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 26-2:** Mecanismo de control para regular la humedad del aire de secado

Fuente: (Minea, 2013)

Este simple método de refrigeración permite controlar la transferencia de calor del evaporador y el rendimiento de la bomba. Está basado en la observación de que la velocidad del aire más baja (flujo) al evaporador aumenta la eliminación de humedad (condensación).

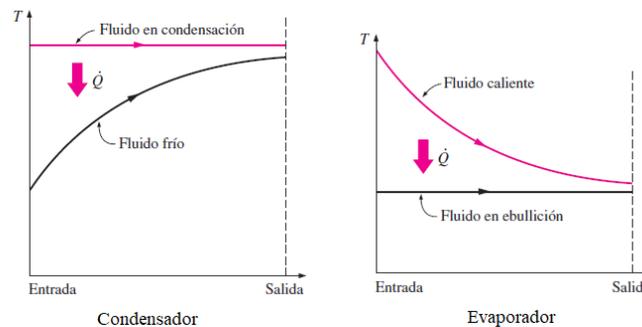
b.) Otro método utilizado para controlar la capacidad deshumidificación de la bomba de calor, está en realizar una operación intermitente de la bomba de calor. Según (Chua, 2000) usando un secado intermitente de temperatura para secar muestras de papa, acortó los tiempos de secado hasta 61% en comparación con un secado a temperatura constante. En este estudio señalan, en la mayoría de los casos, se redujeron los tiempos de secado observado y los productos finales mostrados mejoraron su calidad.

#### 2.10.4 Intercambiadores de calor (condensador y evaporador)

Según (Cengel Y. A., 2007), dos tipos de intercambiadores de calor se usan en la bomba de calor (condensador y evaporador), en estos los fluidos pasan por un proceso de cambio de fase y la razón de la transferencia de calor se expresa como:

$$Q = U * A_s * \Delta T_{ml} \quad (77)$$

Dónde U es el coeficiente total de transferencia de calor,  $A_s$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T_{ml}$  es una apropiada diferencia promedio de temperatura entre los dos fluidos.



**Figura 27-2:** Variación de las temperaturas de los fluidos en un condensador y evaporador

Fuente: (Cengel Y. A., 2007)

a.) **Área superficial de transferencia de calor  $A_s$ :** Se determina en forma precisa aplicando las dimensiones del intercambiador de calor según (Valdés, 2017), donde se utiliza las siguientes formulas:

$$Nf = \frac{L}{tf + Pal} \quad (78)$$

Área exterior incluyendo las aletas:

$$A_{ext} = 2 * \left( An * Alet - \pi * \left( \frac{De}{2} \right)^2 * Ntotal \right) * Nf + (L - tf * Nf) * \pi * De * Ntotal \quad (79)$$

Dónde:

$Nf$ = Número de aletas que conforman el intercambiador

$L$ = Longitud de los tubos del intercambiador

$tf$ = Espesor de la aleta

$Pal$ = Paso entre aletas

$A_{ext}$ = Área exterior del intercambiador de calor

$An$ = Ancho de la aleta

$Alet$ = Alto de la aleta

$De$ = Diámetro exterior de los tubos del intercambiador

$Ntotal$ = Numero de tubos totales

b.) **Temperatura media logarítmica:** Para determinar esta temperatura se utiliza la siguiente fórmula, que es un método apropiado de la diferencia de temperatura promedio según (Cengel Y. A., 2007)

$$\Delta T_{ml1} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (80)$$

En este caso  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  representa la diferencia de temperatura entre los dos fluidos en ambos extremos (de entrada y de salida) del intercambiador.

A esta fórmula se le debe agregar un factor de corrección para la temperatura media logarítmica, quedando la fórmula de la siguiente forma:

$$\Delta T_{ml} = F * \Delta T_{ml1} \quad (81)$$

Para el caso de los condensadores y evaporadores este factor es igual a uno (1) según (Cengel Y. A., 2007).

## 2.11 Pruebas de normalidad

Según (Romero-Saldaña, 2016), cuando se desean saber si los datos de una muestra pueden considerarse que proceden de una determinada distribución o modelo de probabilidad, se utilizan las pruebas de ajuste. Una de estas pruebas es la de Kolmogorov-Smirnov, que sirven para verificar si los datos de una muestra proceden de una distribución normal y se emplea para variables cuantitativas continuas, cuando el tamaño de la muestra es mayor de 50, considerando una hipótesis nula, que significa que procede de una distribución normal y su valor debe ser mayor a 0,05.

## 2.12 Cálculo de conductos de Aire

Para el cálculo de conductos de aire se recurre a la ecuación general de Bernoulli, que se cumple al no existir pérdidas de energía por rozamiento, es decir se mantiene constante a lo largo de un mismo ducto (sin bifurcaciones o uniones) la energía en forma de presión, más la energía en forma cinética, más la energía potencial y su fórmula es la siguiente:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g * z = cte \quad (82)$$

Dónde:

P= Presión del sistema (Pa)

$\rho$ = Densidad del fluido (Kg/m<sup>3</sup>)

g=Constante de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

z=Altura o elevación (m).

### 2.12.1 Definición de pérdida de carga

Según (Toro Mesa), se define la pérdida de carga como la diferencia de presión hidrostática existente entre dos puntos de una tubería, que se debe la pérdida energía por el rozamiento del fluido con las paredes de los conductos, si no existieran estas pérdidas se aplicaría la ecuación de Bernoulli. Estas pérdidas de carga se clasifican en:

#### a.) Pérdida de carga por rozamiento debido a la circulación del fluido por el conducto.

Según (Toro Mesa), para el caso particular de fluidos no compresibles, donde el rango de temperaturas se encuentra entre 15 y 40 °C, con una altitud inferior a 1000 m, variaciones de humedad relativa entre el 0% y 90% y conducciones a baja presión, se aplica la siguiente fórmula:

$$\Delta P = \alpha * 14,1 * 10^{-3} * L * \frac{V^{1,82}}{D_H^{1,22}} \quad (83)$$

Dónde:

$\Delta P$ = Diferencia de presión en el tramo de conducto analizado (Pa)

$\alpha$ = factor que depende del material utilizado, para chapa galvanizada es de 0,9 adimensional

L= Longitud del conducto (m)

V= velocidad del fluido (m)

$D_H$ = Diámetro hidráulico (m)

Para diferentes cotas de altura la diferencia de presión se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta P = 11,8 * z \quad (84)$$

Donde z es la altura o cota sobre un plano arbitrario en metros.

La fórmula para calcular el diámetro hidráulico en un conducto rectangular es la siguiente

$$D_H = 1,3 * \frac{(a * b)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}} \quad (85)$$

Dónde,  $D_H$  es el diámetro hidráulico, a y b son las longitudes de los perímetros de la sección rectangular.

#### **b.) Pérdida de carga en accesorios o singularidades**

Corresponden a los puntos o tramos donde el flujo sufre perturbaciones de velocidad por cambios de direcciones o variación de sus valores absolutos, para determinar estas pérdidas se recurre a los coeficientes para pérdidas locales, según (Isover Saint-Gobain, 2009) y (Estudios Energéticos Para Mantenimiento, S.L., 2020), las fórmulas para determinar las pérdidas de carga son las siguientes:

- Fórmula para la pérdida de carga en uniones debido a las configuraciones geométricas

$$\Delta P = C * \rho * \frac{V^2}{2} \quad (86)$$

Dónde:

C=Coficiente de pérdidas (adimensional).

$\Delta P$ = Pérdida de presión total en la sección considerada (Pa).

$P_d$ = Presión dinámica en la sección considerada (Pa).

V= Velocidad de aire a través del conducto

- Cuando el fluido cambie de dirección en un conducto, las consideraciones geométricas deben complementarse con otro coeficiente que afecta a las características propias del aire circulante, mediante correcciones debidas al número de Reynolds y si fórmula es la siguiente:

$$C = C' + K_{Re} \quad (87)$$

Dónde:

$C'$  = Coeficiente de pérdidas por características geométricas (adimensional).

$K_{Re}$ : Coeficiente de pérdidas por flujo (adimensional).

### c.) Pérdida de presión en la cámara de secado

Según (Gutiérrez Flórez & Copete López, 2009) recomienda una ecuación en función de la humedad del grano, con el cual se puede determinar el caudal de secado como función de la pérdida de presión para café pergamino seco, si bien esta ecuación no recomienda para cacao, pero no se encontró bibliografía que recomiende la caída de presión para los granos a secar.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \left( \frac{\frac{Ca}{A}}{9,523 - 0,0476 * M} \right)^{1,4793} \quad (88)$$

Dónde:

Ca= Caudal de aire, (m<sup>3</sup>/min)

A= Área transversal al flujo, (m<sup>2</sup>)

M=Contenido de humedad (%)

$\Delta P$ : Caída de presión en secciones distantes en L, (cm c.a.)

$\Delta L$ : Distancia entre mediciones de la pérdida de presión, (m)

### 2.12.2 Criterio de selección del ventilador

Según (Toro Mesa), el ventilador deberá poseer una presión total igual a la suma de la mayor pérdida de presión total en el lado de impulsión, más la mayor pérdida de presión total del lado de retorno. La presión estática necesaria será la suma de las presiones totales menos la presión dinámica a la descarga del ventilador y su fórmula es la siguiente:

$$P = \Delta P_i + \Delta P_r - 9,63 * \frac{Ca^2}{16 * S^2} \quad (89)$$

Dónde:

P= Presión necesaria para el Ventilador (Pa)

$\Delta P_i$ = Pérdida de presión máxima total del lado de impulsión

$\Delta P_r$ = Pérdida de presión máxima total del lado de retorno

Ca= Caudal total circulante por la instalación (m<sup>3</sup>/s)

S= Sección de salida del ventilador

### 2.12.3 Cálculo del espesor del aislamiento térmico

Para determinar las pérdidas de calor en los conductos donde fluye el aire caliente se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{(T_i - T_a)}{R_{total}} \quad (90)$$

Dónde:

Q= Flujo de calor (Watts)

T<sub>i</sub>= Temperatura en el interior del ducto (Kelvin)

T<sub>a</sub>= Temperatura ambiente (Kelvin)

R<sub>total</sub>= Resistencia total Térmica (K/W)

La resistencia total térmica se calcula de la siguiente manera, considerando conducción y convección, según (Asociación de fabricantes españoles de lanas minerales aislantes AFELMA)

$$R_{total} = \frac{1}{A_s * h_i} + \frac{2 * e}{\lambda * (P_e + P_i)} + \frac{1}{A_s * h_e} \quad (91)$$

Dónde:

A<sub>s</sub>= área superficial del conducto (m)

h<sub>i</sub>= Coeficiente superficial de transmisión de calor por convección forzada dentro el conducto (W/m<sup>2</sup>K)

e= Espesor del material aislante (m)

λ = Conductividad térmica el material (W/mK)

P<sub>e</sub>= Perímetro exterior de la sección rectangular del conducto (m)

P<sub>i</sub>= Perímetro interior de la sección rectangular del conducto (m)

h<sub>e</sub>= Coeficiente superficial de transmisión de calor por convección natural en el exterior del conducto (W/m<sup>2</sup>K).

Para determinar el coeficiente superficial de transmisión de calor por convección forzada dentro el conducto se utiliza la ecuación de Colburn, según (Cengel Y. A., 2007).

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,3} \quad (92)$$

Dónde:

Nu= Número de Nusselt

Re= Número de Reynolds

Pr= Número de Prandtl

Para calcular el coeficiente, para un flujo turbulento completamente desarrollado en todo el ducto y se determina el número de Nusselt con la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{Lc}{k} hi \quad (93)$$

Dónde:

Un= Número de Nusselt

Lc= Longitud característica (m)

k= Conductividad térmica del fluido (W/mK)

hi= Coeficiente superficial de transmisión de calor por convección forzada dentro el conducto (W/m<sup>2</sup>K)

Para determinar el coeficiente de convección natural se utiliza las siguiente correlación de número de Rayleigh, según (Cengel Y. A., 2007):

$$RaL = \frac{g * \beta(Ts - Ta) * Lc^3}{\nu^2} * Pr \quad (94)$$

Dónde:

RaL= Número de Rayleigh

g= gravedad (m<sup>2</sup>/s)

β= Es el inverso de la temperatura media entre la superficie del ducto y el ambiente (1/Tm)

Ts= temperatura de la superficie del ducto

Ta= temperatura del ambiente

Lc= longitud característica (m)

ν= viscosidad del fluido

Pr= Número de Prandtl

Para calcular el número de Nusselt se utiliza la siguiente fórmula, según (Cengel Y. A., 2007)

$$Nu = \left( 0,6 + \frac{0,387 * RaL^{1/6}}{\left( 1 + \frac{0,559^{9/16}}{Pr} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (95)$$

Dónde:

$Un$ = Número de Nusselt

$RaL$ = Número de Rayleigh

$Pr$ = Número de Prandtl

También se aplica la fórmula del cambio de temperatura longitudinal en una tubería según (Asociación de fabricantes españoles de lanas minerales aislantes AFELMA).

$$T_{fm} - T_a = (T_{im} - T_a) * e^{-\alpha} \quad (96)$$

Dónde:

$T_{fm}$ = Temperatura final del fluido

$T_{im}$ = Temperatura inicial del fluido

$T_a$ = temperatura ambiente

Siendo  $\alpha$  la fórmula correspondiente:

$$\alpha = \frac{U}{m * Cp} \quad (97)$$

Dónde:

$U$ = Transmitancia térmica

$m$ = Flujo másico

$Cp$ = Calor específico a calor constante

La fórmula para la Transmitancia térmica es la siguiente:

$$U = \frac{Q}{T_i - T_a} \quad (98)$$

### CAPÍTULO III

## 3. METODOLOGÍA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SECADOR POR BOMBA DE CALOR

### 3.1 Obtención de las propiedades físicas de las pepas de cacao.

#### 3.1.1 Obtención de la densidad de una pepa de cacao en función de su humedad.

Para la obtención de la densidad se tomó 100 muestras de las pepas de cacao al azar, de las cuales se realizó las medidas de sus longitudes para determinar su volumen, y se va a suponer que las pepas de cacao poseen la forma de una esfera, obteniendo su diámetro geométrico, además se pesó cada pepa de cacao con el fin de relacionar el volumen obtenido con la masa de cada pepa de cacao. Las medidas obtenidas están disponibles en el Anexo A.



**Figura 1-3** Pepa de cacao  
Realizado por: Zhigui Carlos, 2020

Se procede a utilizar un software estadístico SPSS versión demo, para realizar pruebas de normalidad, para determinar si las muestras obtenidas de la medición de la masa siguen una distribución normal, para ello se utilizó la prueba estadística de Kolmogorov -Smirnov, esta se utiliza cuando el tamaño de la muestra es mayor o igual que 50 datos y el valor obtenido (Sig) es mayor que 0,05. Al utilizar el programa se obtiene el valor Sig de 0,087 que es mayor que 0,05 por ende la distribución de la masa de las pepas de cacao sigue una distribución normal.

#### Pruebas de normalidad

|      | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |     |      | Shapiro-Wilk |     |      |
|------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
|      | Estadístico                     | gl  | Sig. | Estadístico  | gl  | Sig. |
| Masa | ,083                            | 100 | ,087 | ,962         | 100 | ,006 |

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Figura 2-3:** Pruebas de normalidad a la medición de la masa de las pepas de cacao.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

De igual manera se realiza la prueba de normalidad a las mediciones de las longitudes (W, T, L) de las pepas de cacao, se puede observar de la figura las tres medidas cumplen la distribución normal.

**Pruebas de normalidad**

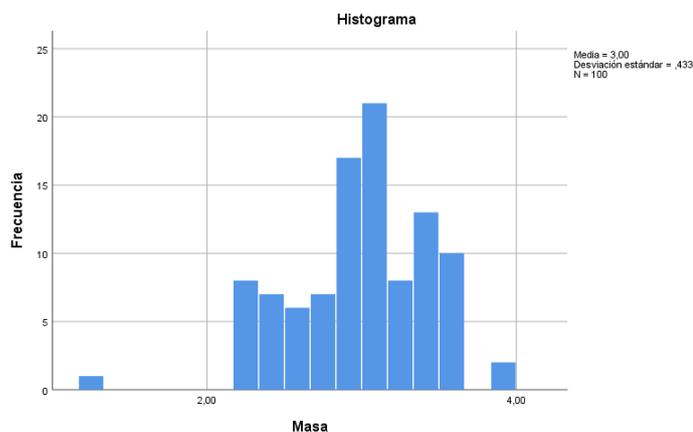
|   | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |     |                   | Shapiro-Wilk |     |      |
|---|---------------------------------|-----|-------------------|--------------|-----|------|
|   | Estadístico                     | gl  | Sig.              | Estadístico  | gl  | Sig. |
| a | ,072                            | 100 | ,200 <sup>*</sup> | ,972         | 100 | ,029 |
| b | ,077                            | 100 | ,157              | ,993         | 100 | ,891 |
| c | ,033                            | 100 | ,200 <sup>*</sup> | ,995         | 100 | ,970 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

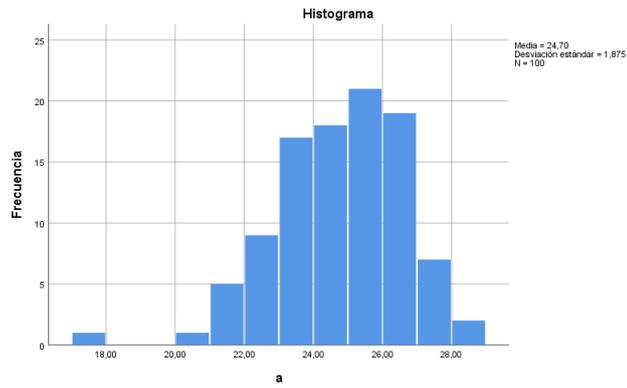
**Figura 3-3** Pruebas de normalidad de las dimensiones de las pepas de cacao.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

A continuación, se presenta el histograma de la variación de las medidas de la masa, del programa se obtiene que el valor mínimo es de 1,26 gramos y el máximo de 3,94 gramos. Además, se obtiene que la media de las mediciones de la masa es de 2,99 gramos, este valor se utilizará para calcular la densidad de las pepas de cacao.

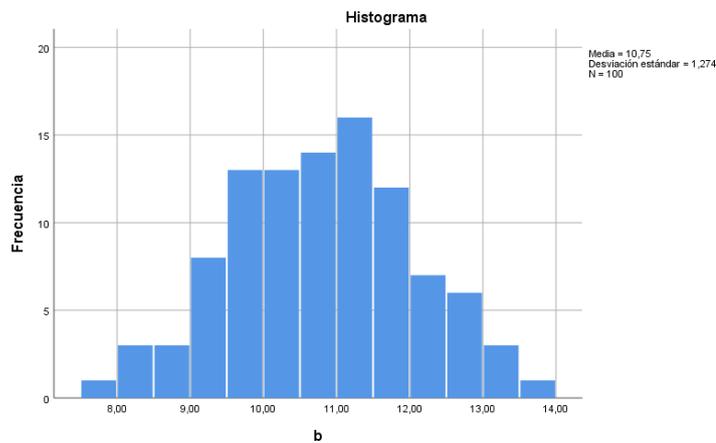


**Figura 4-3** Histograma de las mediciones de la masa  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

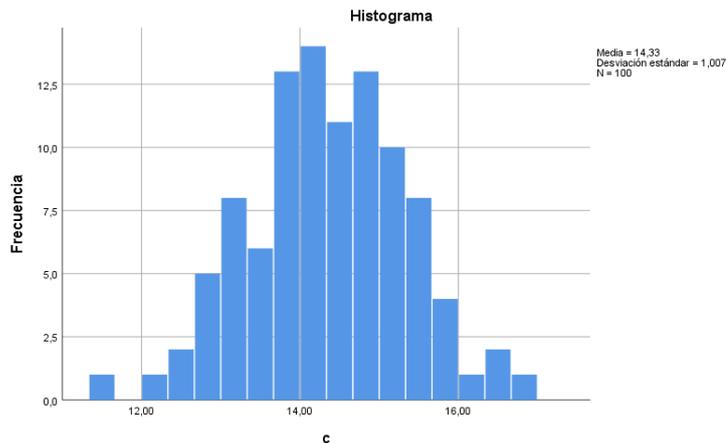
De igual manera se obtiene el histograma de las mediciones de las longitudes de las pepas de cacao.



**Figura 5-3** Histograma mediciones de la longitud L.  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020



**Figura 6-3** Histograma de mediciones de la longitud T  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

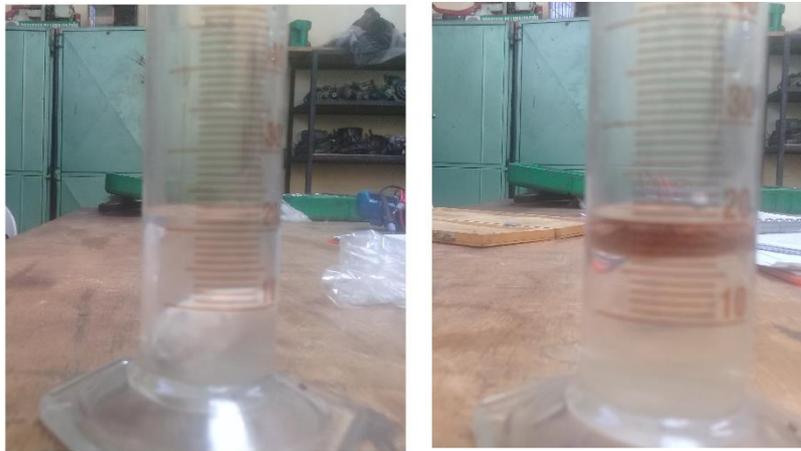


**Figura 7-3** Histograma de mediciones de la longitud W  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Del histograma obtenido de las medidas cabe recalcar que la mínima medida de longitud en (L) es de 17,34 m y la máxima de 28,46 mm, obteniéndose la media de las mediciones de 24,70 mm. De igual manera en la longitud (T) la mínima medida es de 7,62 y 13,86 mm, con un valor medio

de 10,75 mm. También se obtuvo de la longitud (W) el valor mínimo de 11,58 y un máximo de 16,68 mm, con un valor medio de 14,33 mm.

Con las medias de las longitudes se procede a calcular el diámetro geométrico y su volumen, obteniéndose un diámetro de 15,61 mm y un volumen de 1992,28 mm<sup>3</sup> y del programa de Solidworks se obtuvo 2096,17 mm<sup>3</sup>, para corroborar los resultados obtenidos se procedió a medir el volumen que desplaza una pepa de cacao húmeda en una probeta graduada de 100 cm<sup>3</sup>, donde se introdujo una pepa de cacao que cumpla con la media de las mediciones obtenidas y se observó que el desplazamiento fue de 2 cm<sup>3</sup>, cabe recalcar que las medidas obtenidas de las masas y de las dimensiones corresponden a una muestra de cacao húmedo. Obtenido el volumen y su masa se procede a calcular su densidad la cual se obtiene de 1398 Kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 8-3** Pepas de cacao húmeda y seca sumergida en agua  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

En la figura 8-3 se observa que una pepa húmeda se sumerge en agua destilada, por ende, su densidad es mayor a la del agua 1000 Kg/m<sup>3</sup> y a la derecha una pepa seca en agua destilada flota.

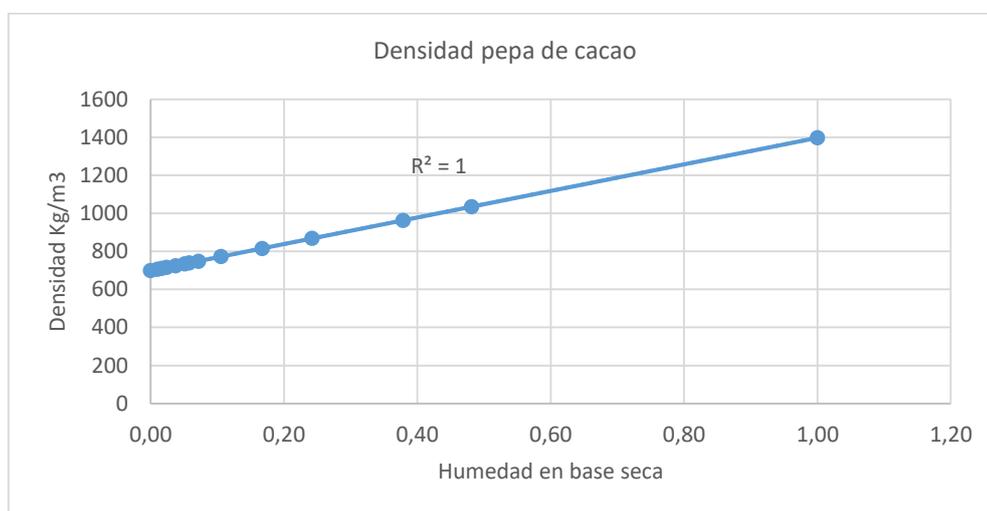
Para proceder a determinar la variación de la densidad con respecto a la humedad se procede a secar una pepa de cacao que corresponda a la media de las muestras tomadas en dimensiones y masa, este secado se lo realizó con secado solar.

**Tabla 1-3** Variación de la densidad con respecto a la humedad en base seca

| Orden | Tiempo en minutos | Variación masa Kg | Humedad base seca | Volumen mm <sup>3</sup> | densidad Kg/m <sup>3</sup> |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1     | 10                | 2,93              | 1,00              | 2096,17                 | 1397,79                    |
| 2     | 210               | 2,17              | 0,48              | 2096,17                 | 1035,22                    |
| 3     | 370               | 2,02              | 0,38              | 2096,17                 | 963,66                     |
| 4     | 630               | 1,82              | 0,24              | 2096,17                 | 868,25                     |
| 5     | 810               | 1,71              | 0,17              | 2096,17                 | 815,77                     |
| 6     | 1050              | 1,62              | 0,11              | 2096,17                 | 772,84                     |
| 7     | 1290              | 1,57              | 0,07              | 2096,17                 | 748,99                     |
| 8     | 1350              | 1,55              | 0,06              | 2096,17                 | 739,44                     |
| 9     | 1467              | 1,54              | 0,05              | 2096,17                 | 734,67                     |
| 10    | 1647              | 1,52              | 0,04              | 2096,17                 | 725,13                     |
| 11    | 1734              | 1,5               | 0,02              | 2096,17                 | 715,59                     |
| 12    | 1854              | 1,49              | 0,02              | 2096,17                 | 710,82                     |
| 13    | 1944              | 1,48              | 0,01              | 2096,17                 | 706,05                     |
| 14    | 2064              | 1,465             | 0,00              | 2096,17                 | 698,89                     |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Una vez obtenido las medidas de la variación de la densidad con respecto a la humedad se procede a determinar su ecuación. Se puede observar en la gráfica que se obtiene un coeficiente de determinación (R) de 1, lo que indica que los valores se ajustan al modelo de la variable.



**Gráfico 1-3:** Variación de la densidad del cacao en función de la humedad en base seca.

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Lo determinado hasta ahora en lo que se refiere a la densidad se comparó con el estudio que realizó (Plange & Baryeh, 2003), en donde determina la tendencia de la variación de la densidad con respecto al porcentaje de contenido de humedad en base húmeda., figura 8-2.

Al comparar la tendencia de la densidad medida y la obtenida por (Plange & Baryeh, 2003), se puede observar una tendencia lineal, por lo tanto la ecuación de la densidad en función de la humedad en base seca queda definido de la siguiente manera:

$$\rho = 698,89X + 698,89 \quad (99)$$

### 3.1.2 Obtención de la densidad aparente de una pepa de cacao en función de su humedad.

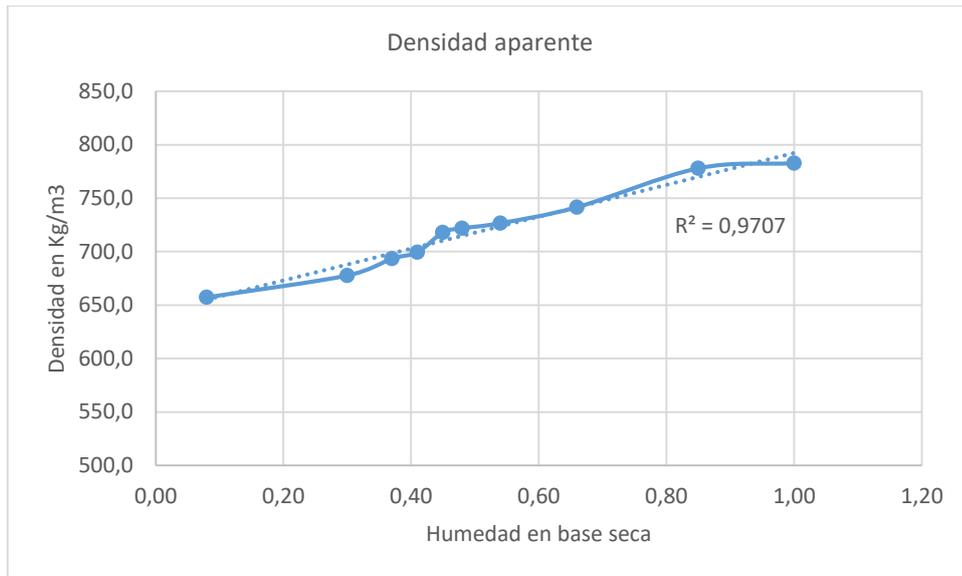
Para determinar la densidad aparente de las pepas de cacao se procedió a medir en un volumen de 220 cm<sup>3</sup> la masa que contenida de las pepas de cacao en ese volumen en función de su humedad en base seca.

**Tabla 2-3** Valores densidad aparente con respecto a la humedad en base seca.

| Humedad e<br>base seca | Masa contenida<br>gramos | densidad aparente<br>Kg/m <sup>3</sup> |
|------------------------|--------------------------|--|
| 1                      | 172,24                   | 782,91                                 |
| 0,85                   | 171,17                   | 778,05                                 |
| 0,66                   | 163,17                   | 741,68                                 |
| 0,54                   | 159,88                   | 726,73                                 |
| 0,48                   | 158,82                   | 721,91                                 |
| 0,45                   | 157,99                   | 718,14                                 |
| 0,41                   | 153,91                   | 699,59                                 |
| 0,37                   | 152,57                   | 693,50                                 |
| 0,30                   | 149,1                    | 677,73                                 |
| 0,08                   | 144,61                   | 657,32                                 |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

Una vez obtenido las medidas de la variación de la densidad al granel o aparente con respecto a la humedad en base seca se procede a determinar su ecuación. Se puede observar en la gráfica que se obtiene un coeficiente de determinación (R) de 0,97, lo que indica que los valores se ajustan al modelo de la variable.



**Gráfico 2-3:** Variación de la densidad aparente del cacao en función de la humedad  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

La fórmula de la densidad aparente es:

$$\rho_g = 148,55 * X + 643,71 \quad (100)$$

### 3.2 Diseño del tambor rotativo

#### 3.2.1 Masa del producto en función de la posición angular del tambor rotativo.

Este análisis se lo realiza en la sección transversal del tambor. Las pepas de cacao serán transportadas por una paleta que está en función del ángulo de reposo, de la geometría de la paleta y de su posición angular.

Para calcular la variación de la masa, se ha realizado una función en Matlab, a continuación, se detalla las entradas de la función.

```

clc;
clear;
global L1 L2 Alpha X Lp R nf
%% Función masatheta
%% Datos geométricos y datos del material
L1=6; %%cm Longitud del labio
L2=10; %% cm Longitud de la base de la paleta
Alpha=110; %% Ángulo entre segmentos de paleta
X=1; %% Humedad base seca dato del material
Lp=0.40; %% Ancho de la paleta

```

$R=0.35$ ; % radio del tambor  
 $nf=6$ ; %% número de paletas

Los datos geométricos incluyen las dimensiones de la paleta y el radio interior del tambor. En este caso se ha tomado el ejemplo de una paleta conformada por dos segmentos, base y labio, los que se explican en el capítulo 2.

El ángulo de reposo depende fuertemente del contenido de humedad en el producto más que de cualquier otro parámetro, para este caso se aplica la ecuación (6), y se va a considerar el ángulo de reposo constante con una humedad del 21% en base húmeda, con lo cual se obtiene 33,55 grados.

Para estimar la masa en la paleta, lo que se hace es multiplicar el área transversal en donde se aloja el material, asumida uniforme, por la profundidad o ancho de paleta ( $L_p$ ) para obtener el volumen. Luego, se multiplica dicho volumen por la densidad al granel o aparente del cacao en función del contenido de humedad.

Una vez aclarados los puntos relacionados con las variables de entrada de las formulas desarrolladas en Matlab, se presenta ahora el código correspondiente con sus ecuaciones.

```
%% Fórmulas de ingreso de las ecuaciones
Alpha_1=Alpha*pi/180; %% convierte el ángulo entre segmentos de grados a radianes
gamma=0;
gamma_1=gamma*pi/180;
theta_o=0;
theta_or=theta_o*pi/180;
theta=170;
theta_r=theta*pi/180;
ntheta_r=theta+1;
dtheta_r=theta_r/(ntheta_r-1);
dtheta_d=theta/(ntheta_r-1);
theta_1=zeros(ntheta_r,1);
theta_1(1,1)=theta_or;
theta_2=zeros(ntheta_r,1);
theta_2(1,1)=theta_o;
g=9.81; %%m/s2
L11=L1/100; %% m Longitud del labio
```

```

L22=L2/100; %% m Longitud de la base de la paleta
den=148.55*X+643.71; %% densidad al granel del producto en función de la humedad
L3=(L11^2+L22^2-2*L11*L22*cos(Alpha_1)) ^ (1/2);
phi_m=asin((L11*sin(Alpha_1))/L3);
Ro=(L3^2+R^2-2*L3*R*cos(phi_m+gamma_1)) ^ (1/2)
xi=acos((Ro^2+R^2-L3^2)/(2*Ro*R));
xi_d=xi*180/pi;
masa=zeros(ntheta_r,1);
F=zeros(ntheta_r,1);
F(1,1)=0;
producto=zeros(ntheta_r,1);
producto(1,1)=0;
theta_BAR=zeros(ntheta_r,1);
theta_BAR(1,1)=0;
V=zeros(ntheta_r,1);
for i=1: ntheta_r
    theta_1(i+1,1)=theta_1(i,1)+dtheta_r;
    theta_2(i+1,1)=theta_2(i,1)+dtheta_d;
phi_deg=33.55; %%Angulo de reposo
phi=phi_deg*pi/180;
xA=L11;
yA=0;
xB=L11-L22*cos(Alpha_1);
yB=L22*sin(Alpha_1);
delta=(pi+xi+gamma-Alpha_1-theta_1(i,1));
delta_d=delta*180/pi;
if (phi+delta>=atan(yB/xB))
    XO=Ro*cos(theta_1(i,1));
    YO=Ro*sin(theta_1(i,1));
    a=(tan(phi))^2+1;
    b=2*tan(phi)*(YO-XO*tan(phi));
    c=(XO*tan(phi))^2-2*XO*YO*tan(phi)+YO^2-R^2;
    XW=(-b+(b^2-4*a*c)^(1/2))/(2*a);
    YW=(R^2-XW^2)^(1/2);
    yW=YW*cos(delta)+XW*sin(delta)-Ro*sin(theta_1(i,1) +delta);
    xW=(Ro*sin(theta_1(i,1)) +yW*cos(delta)-YW)/sin(delta);
    beta=phi+delta-atan(yB/xB);

```

```

beta_d=beta*180/pi;
OW=(xW^2+yW^2)^(1/2);
OB=(xB^2+yB^2)^(1/2);
A1=0.5*L11*L22*sin(Alpha_1);
A2=0.5*OB*OW*sin(beta);
AREA=(A1+A2);
end
if (phi+delta<=atan(yB/xB))
    xP=(L11*tan(Alpha_1))/(tan(phi+delta)+tan(Alpha_1));
    yP=-tan(Alpha_1)*(xP-L11);
    AP=((xP-L11)^2+yP^2)^(1/2);
    AREA=0.5*L11*AP*sin(Alpha_1);
    if (phi+delta<=0);
        AREA=0; % Área total de la paleta
    end
end
end
V(i,1)=AREA*Lp; %% Volumen en función del ángulo del tambor rotativo
masa(i,1)=den*V(i,1); %% Masa en función del ángulo del tambor rotativo
for j=1:ntheta_r-1 %% Bucle para determinar el ángulo y la altura promedio
    F(j+1,1)=(masa(j,1)-masa(j+1,1))/masa(1,1);
    producto(j+1)=F(j+1)*theta_1(j+1);
    theta_BAR(j+1)=theta_BAR(j)+producto(j+1);
end
end
theta_BARr=(theta_BAR(ntheta_r,1));
theta_BARd=(theta_BAR(ntheta_r,1))*180/pi %% Angulo promedio de la caída de las pepas
de cacao en grados
XO_1=Ro*cos(theta_BARr); %% distancia en x medido desde el eje central del tambor
YO_1=Ro*sin(theta_BARr); %% distancia en y medido desde el eje central del tambor
YBAR=YO_1+(R^2-XO_1^2)^(1/2) %Altura promedio de caída de las partículas
%% Restricciones geométricas
H=V(1,1)*(nf+1)/2; %% Volumen de las pepas de cacao contenido en el tambor
Vc=pi*R^2*Lp; %% Volumen del cilindro secador
mmax=masa(1,1)*nf %% masa máxima cuando theta es igual a cero
RG1=H/Vc*100 %% menor a 15% y mayor a 5%, Restricción geométrica 1
RG2=nf/(2*R) %% menor a 10 y mayor a 5, Restricción geométrica 2
figure(1)

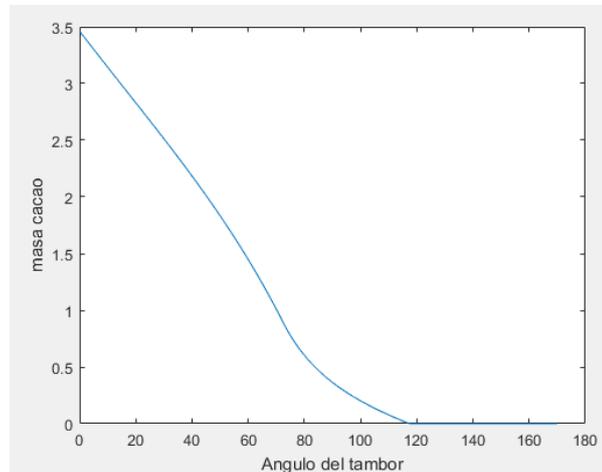
```

```

plot (theta_2(1: ntheta_r,1), masa (1: ntheta_r,1))
ylabel ('masa cacao')
xlabel ('Angulo del tambor')

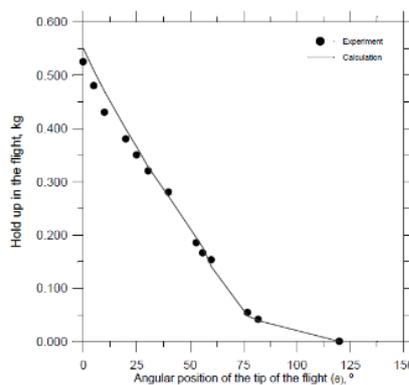
```

Al ejecutar el programa realizado se obtiene los siguientes resultados:



**Gráfico 3-3:** Masa de la paleta en función del ángulo  
**Realizado por:** Carlos Zhigui, 2020

Del gráfico se puede observar que la masa obtenida en las paletas llega a cero cuando el ángulo es de 119 grados. Esta figura generada del área de la paleta en función del ángulo, se la comparo con la obtenida en la investigación realizada por (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007).



**Figura 9-3** Masa en función de la posición angular  
**Fuente:** (Lisboa, Vitorino, Delaiba, D.Finzer, & S. Barrozo, 2007)

Esto se realiza para corroborar los cálculos realizados, como se aprecia las figuras siguen igual tendencia.

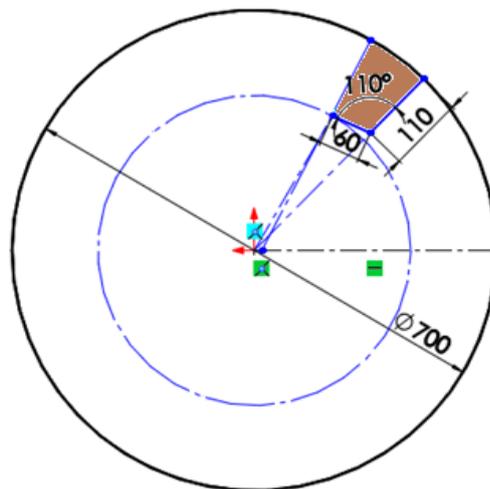
El objetivo de ingresar los datos las formulas desarrolladas en Matlab, es de determinar las dimensiones del secador rotativo, una vez obtenida las dimensiones adecuadas se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 3-3** Influencia de los parámetros del secador en función de la humedad del producto

| Humedad | masa máxima (Kg) | Angulo de vaciado | Restricción geométrica 1 | Altura caída promedio | Angulo promedio |
|---------|------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1       | 23,56            | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |
| 0,82    | 22,77            | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |
| 0,63    | 21,93            | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |
| 0,45    | 21,13            | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |
| 0,26    | 20,29            | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |
| 0,08    | 19,5             | 118               | 11,27                    | 0,49                  | 51              |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Los datos obtenidos de la tabla corresponden a las medidas indicadas en la figura, el área sombreada representa al área que ocupa las pepas de cacao que multiplicado por la longitud del secador dan el volumen y a la vez al multiplicarla por la densidad aparente del producto se obtiene la masa en función del ángulo, pero esta área es máxima cuando el ángulo es cero grados.



**Figura 10-3:** Dimensiones de las paletas del tambor rotativo

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

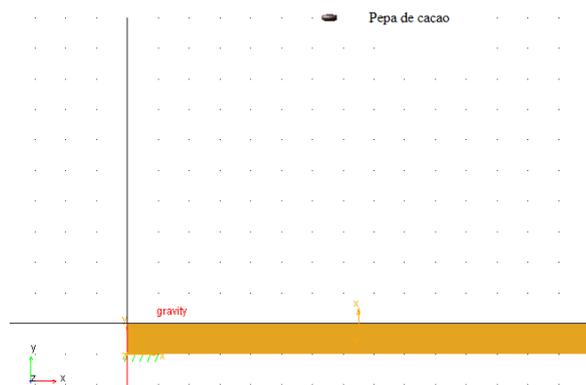
Con estas dimensiones se cumplen las restricciones geométricas establecidas por (Mujumbar, 2006), la restricción geométrica 1 máxima es de 11,27 y es permitido entre 5 al 15 %, la restricción geométrica 2 y la restricción geométrica 2 se tiene de 8,57 y el rango permitido es de 5 a 10. Por lo tanto, se tiene las dimensiones del área transversal del secador rotativo.

Para la selección del material para el tambor rotativo se utiliza el acero AISI 304, el cual es recomendado para la industria alimenticia, según (Ibarra Echeverria, Núñez Solís, & Huerta Ibáñez, 2010)

### 3.2.2 Simulación del rebote de una pepa de cacao en Adams.

Para determinar el rebote de las partículas al impactar con el fondo de la secadora y el movimiento de las partículas en el mismo, se usa el software Adams, en la función impacto, pero esta función solicita el ingreso del coeficiente de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento de una pepa de cacao, la escasa información sobre estos valores, esto se indica porque solo se encontró una investigación realizada por (Faborode & Dinrifo, 1994), pero en esta determinan los coeficientes en una cascara de cacao, mas no en una pepa de cacao.

Esto llevo a realizar una prueba de rebote de las pepas de cacao, desde una altura de 50 cm con una velocidad inicial de cero y en un piso que corresponde a una plancha de acero inoxidable 304, se mide la altura de rebote y arrojaron los siguientes valores, con una pepa de cacao con una humedad en base seca de 1, la pepa rebotó aproximadamente 1 cm y con una pepa seca la altura de rebote fue de aproximadamente 5 cm, esta misma prueba se la lleva a cabo en Adams suponiendo que parte del reposo a una altura de 50 cm, se ingresan los datos promedios de una pepa de cacao, la densidad de la pepa de cacao y en la parte del piso se coloca la plancha de acero, se ingresan los valores de coeficiente de rigidez y de amortiguamiento, hasta que la altura de rebote indique los valores obtenidos en las mediciones.



**Figura 11-3** Esquema rebote de una pepa de cacao en Adams

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

Pero como no se tiene un valor de referencia de la rigidez de una pepa de cacao, se recurre primero a obtener un valor aproximado del coeficiente de rigidez de contacto, para ello se usa la teoría de la mecánica de contacto de Hertz y la teoría del impacto de la física clásica, descritos en el capítulo II.

Para determinar el Modulo de Elasticidad de una pepa de cacao se va a utilizar la ecuación (27), donde se va a utilizar una humedad del 8%. El valor del radio de radio de la pepa de cacao se obtiene del diámetro geométrico de la partícula que es de 7,8 mm, por considerar el contacto entre esfera y plano.

Para determinar la fuerza ejercida en el impacto se utiliza la conservación de la energía, considerando caída libre, con una velocidad inicial de cero, con esto determina a velocidad final en el impacto la cual se utiliza la ecuación (31) y la ecuación (32), donde la velocidad antes del impacto con la placa de acero y  $h_1$  es la altura desde donde se lanza la pepa de cacao, para este caso es de 50 cm, obteniendo una velocidad de 3,13 m/s y una energía cinética antes del impacto de 0,0147 Joules.

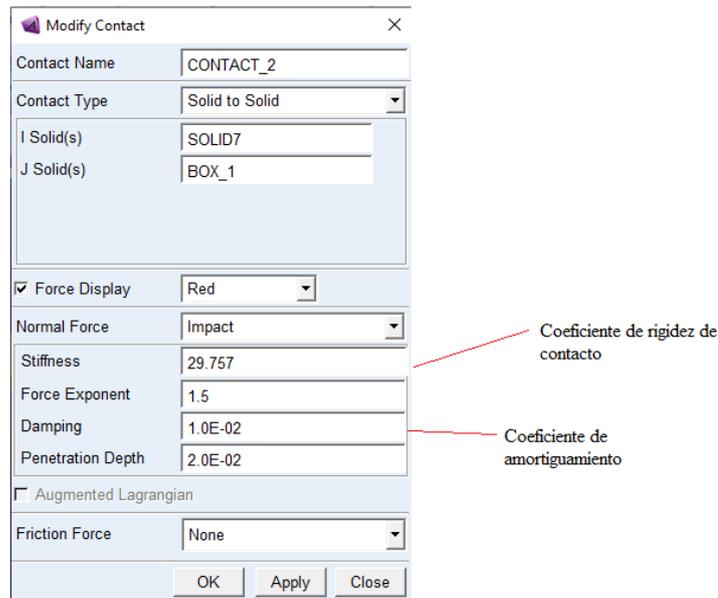
Con estos valores no es suficiente determinar la fuerza de impacto, para ello se necesita medir la distancia a la que rebota la pepa de cacao, para ello se tiene que una pepa de cacao rebota aproximadamente una distancia de 5 cm y para una pepa de cacao húmeda rebota 1 cm aproximadamente. Para esto se utiliza otra vez la ecuación de la conservación de la energía y se aplica la fórmula para una colisión en línea recta, ecuación (33), los resultados se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 4-3** Parámetros de contacto de una pepa de cacao

|              | Altura caída libre (cm) | Velocidad antes del impacto (m/s) | Distancia de rebote (cm) | Fuerza de impacto (Newton) | Coefficiente de rigidez de contacto (N/m) |
|--------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Cacao seco   | 50                      | 3,13                              | 5                        | 0,15                       | 24837                                     |
| Cacao húmedo | 50                      | 3,13                              | 1                        | 1,47                       | 15592                                     |

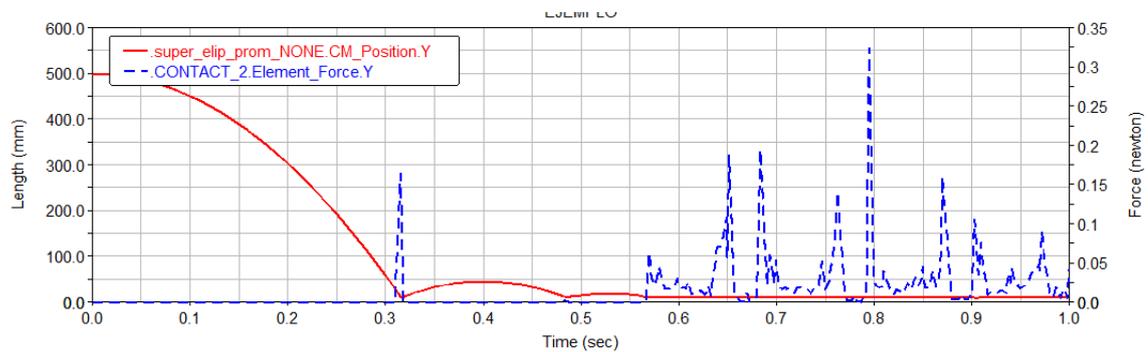
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Los datos obtenidos de la tabla permiten iniciar la simulación del comportamiento de una pepa de cacao dentro de un secador rotativo.



**Figura 12-3:** Valores de ingreso para la función contacto de Adams.  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Para el coeficiente de amortiguamiento el presente autor (Giesbers, 2012), recomienda que sea menor del 0,01% del valor de coeficiente de rigidez y para el exponente de la fuerza de contacto sugiere de 1,5.



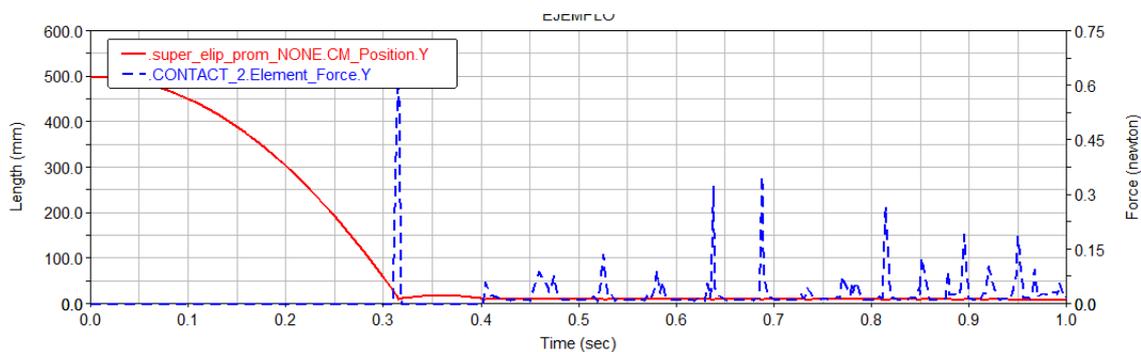
**Figura 13-3:** Rebote de una pepa de cacao seca  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Con los valores iniciales se procede a realizar la simulación para verificar el comportamiento de rebote de la pepa de cacao real con el simulado, para este caso se desea una distancia de rebote de 5 cm, esto se observa en la figura, donde indica la distancia de rebote y la fuerza de contacto que se genera en el proceso. Esto valores se obtuvieron con una rigidez de contacto de 30 N/mm, un coeficiente de amortiguamiento de 0,009 Ns/mm, un exponente de fuerza de 1,5 y una profundidad de penetración de 0,02. A continuación, se indica la figura donde se observa el rebote de una pepa de cacao seca.



**Figura 14-3:** Prueba de rebote pepa de cacao seca.  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

De igual manera se realizó la simulación para una pepa de cacao húmeda, considerando la rigidez constante y se va a suponer que el contenido de agua que posee la pepa de cacao hace variar el coeficiente de amortiguamiento, hasta obtener una altura de rebote de 1 cm aproximadamente, obteniéndose un coeficiente de amortiguamiento de 0,015 N.s/mm.



**Figura 15-3:** Rebote de una pepa de cacao húmeda  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Los valores calculados fueron datos iniciales para la simulación, luego esto se verifico en el software Adams, indicando los valores para los cuales se analizará el comportamiento de una pepa de cacao dentro de un tambor rotativo.

**Tabla 5-3** Parámetros de contacto de una pepa de cacao

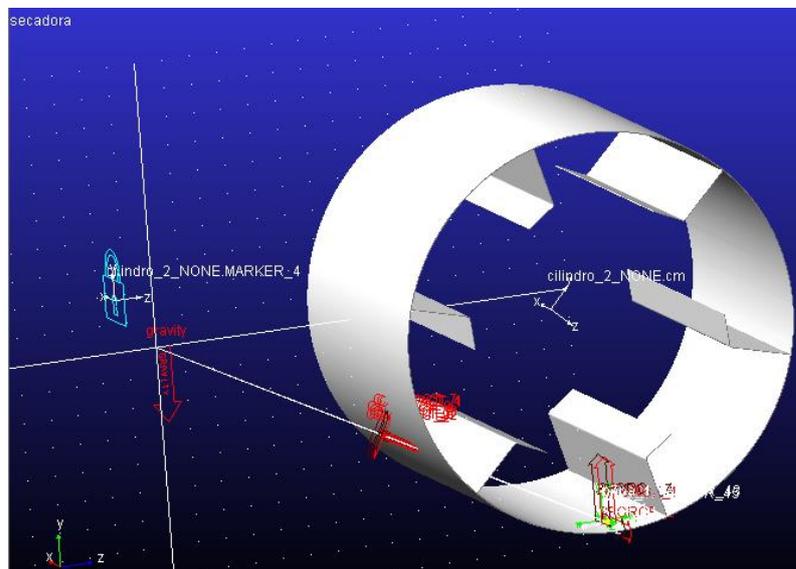
|              | Fuerza de impacto de contacto calculada (Newton) | Fuerza de impacto de contacto simulada (Newton) | Coefficiente de rigidez de contacto calculada (N/mm) | Coefficiente de rigidez de contacto simulada (N/mm) | Coefficiente de amortiguamiento de contacto simulada (N.s/mm) |
|--------------|--|---|--|---|---|
| Cacao seco   | 0,15   | 0,164   | 24,83  | 30  | 0,009   |
| Cacao húmedo | 1,47   | 0,715   | 15,59  | 30  | 0,015   |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

En la tabla 6-3 se indican los valores calculados con los que funcionó en la simulación, estos ultimo serán los utilizados para analizar el comportamiento de una pepa de cacao dentro del tambor rotativo y a la vez determinar la máxima fuerza de contacto que ocurre con la pepa de cacao, para determinar el esfuerzo de contacto que estará sometido la pepa.

### 3.2.3 Simulación del movimiento de una pepa de cacao en Adams

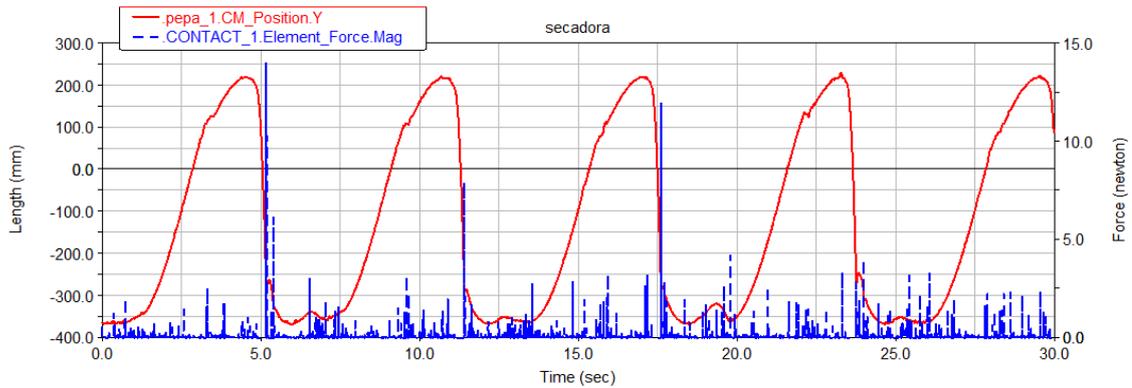
Para determinar el comportamiento de una pepa de cacao, se analiza una sección del secador rotativo, se introducen los valores previamente determinados del contacto entre la pepa de cacao y el acero inoxidable 304.



**Figura 16-3:** Secador rotativo en Adams.

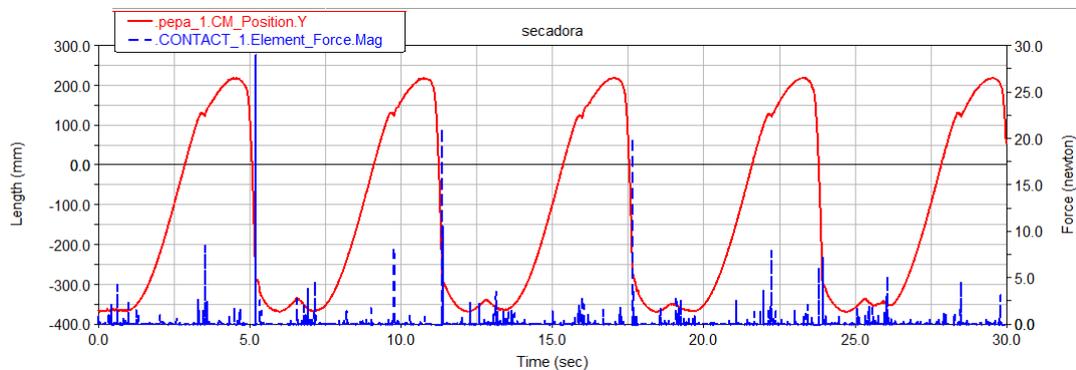
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Con los valores indicados anteriormente se obtienen las gráficas del comportamiento de la posición en el sentido de la gravedad de la pepa de cacao y la fuerza de contacto máxima que ocurre con una velocidad de rotación de 8 rpm



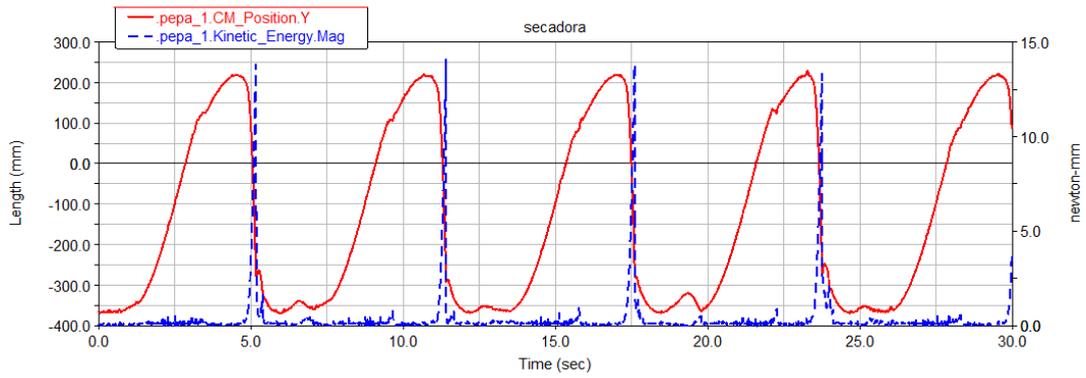
**Figura 17-3:** Posición y fuerza de contacto en un secador para una pepa de cacao seca  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

En la figura se observa que la máxima fuerza de contacto en una pepa de cacao seco generada es de 14 Newton y el tiempo de vuelo es de 1,14 segundos. Esta prueba también se realizó para el análisis de la pepa de cacao húmeda donde el tiempo de vuelo es de 1,1 segundos y la máxima fuerza de 30 Newton.

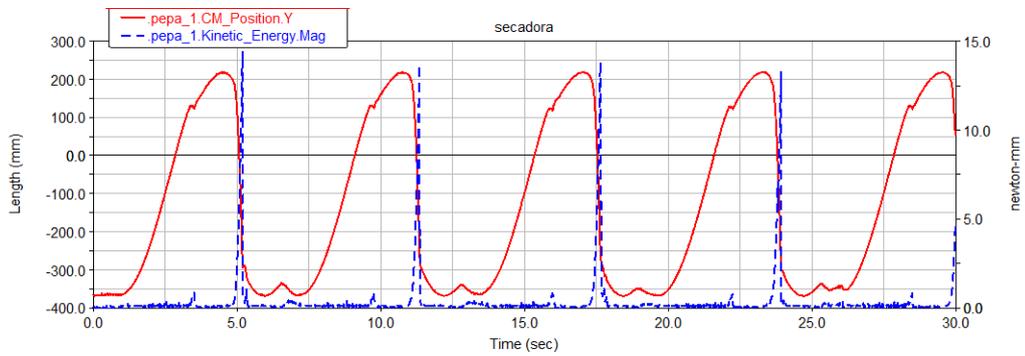


**Figura 18-3:** Posición y fuerza de contacto en un secador para una pepa de cacao húmeda  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

Para determinar la velocidad rotación a la que se debe someter una pepa de cacao dentro de un tambor rotativo se debe analizar la variación de la energía cinética en la pepa de cacao (rebotes dentro del tambor rotativo), para la velocidad de rotación elegida se observa que solo existe energía cinética cuando la pepa de cacao toca el fondo del tambor rotativo, como se observa en las figuras 17-3 y 18-3

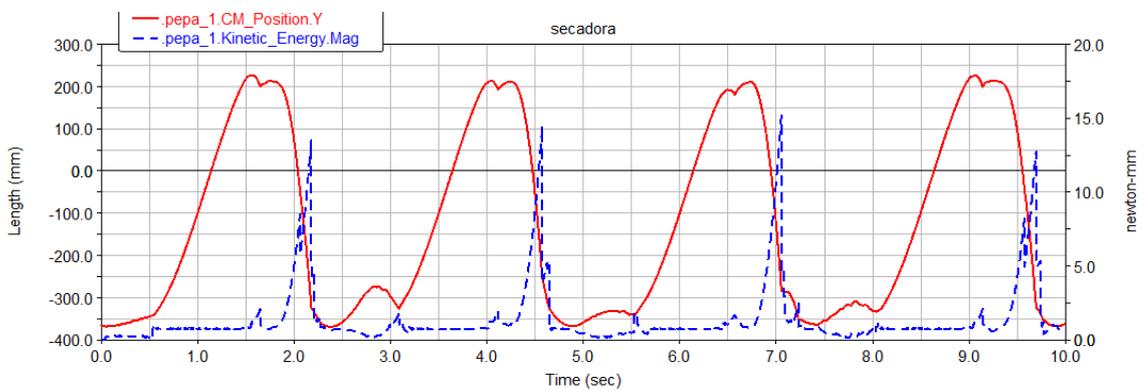


**Figura 19-3:** Energía cinética de la pepa de cacao seco  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

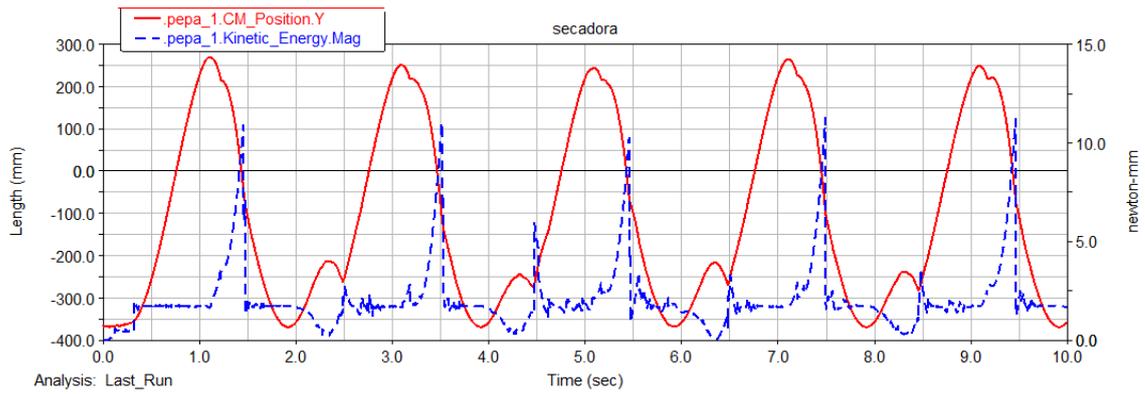


**Figura 20-3:** Energía cinética de la pepa de cacao húmeda  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

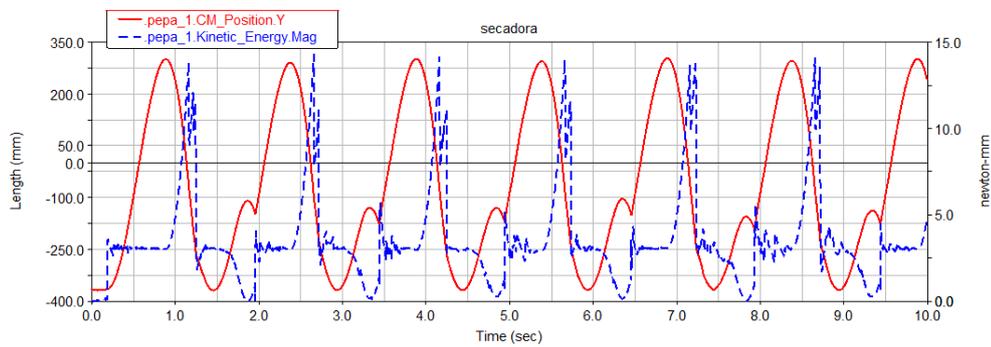
Se realizó la simulación a diferentes velocidades de rotación para determinar a qué velocidad las pepas de cacao rebotan demasiado dentro del tambor, hasta una velocidad de 20 rpm, las pepas solo rebotan cuando caen de las paletas, pero cuando esta revolución es mayor, se realizó la simulación a 30 y 40 revoluciones no solo rebotan cuando caen de las aletas, sino también cuando están dentro de ellas, esto se observa en las figuras 19-3, 20-3 y 21-3



**Figura 21-3:** Variación de la energía cinética a 20 rpm  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

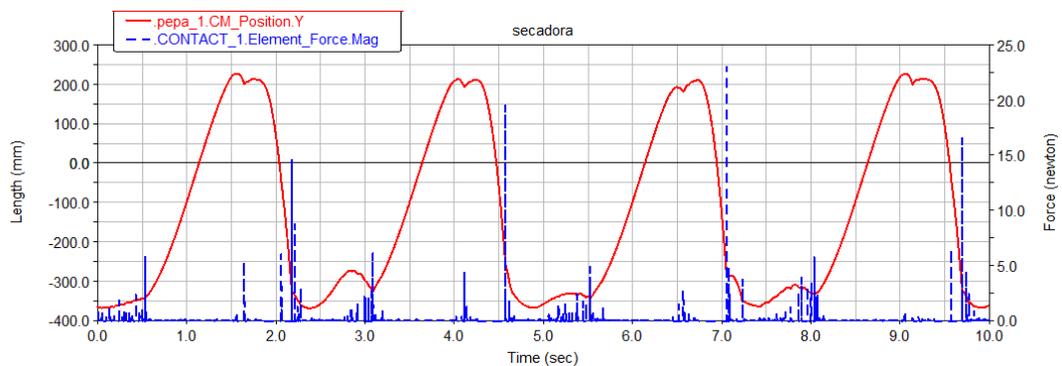


**Figura 22-3:** Variación de la energía cinética a 30 rpm  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

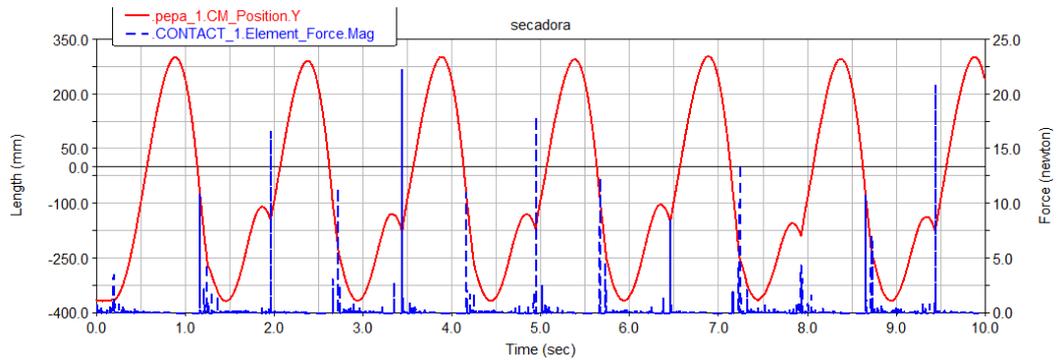


**Figura 23-3:** Variación de la energía cinética a 40 rpm  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020

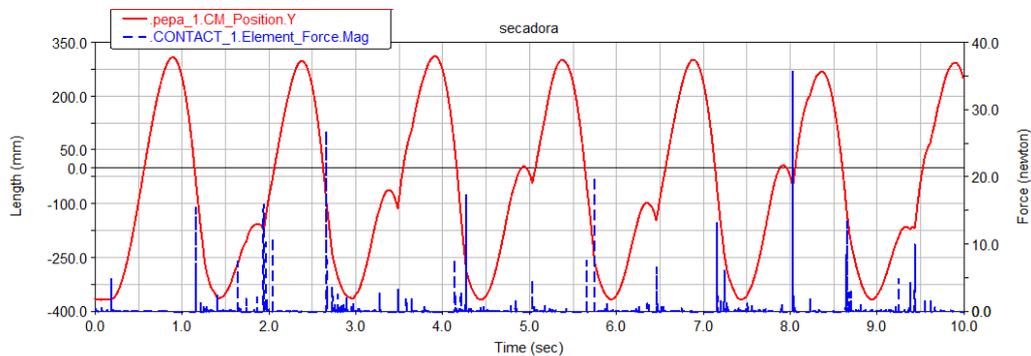
Además, se analizó la fuerza de contacto que se genera a 20,30 y 40 rpm, en esta última se obtuvo la mayor fuerza de contacto de 35 Newton, si bien existe un aumento en la fuerza, esta no es suficiente para romper una pepa de cacao, esto se indica debido a la investigación realizada por (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015), donde indica que la máxima fuerza para romper una pepa de cacao es de 300 N y la mínima es de 97 Newton. Para corroborar esto se realizó una prueba a una pepa de cacao sometiéndola a un peso de 200 Newton y con este valor se rompió la pepa de cacao.



**Figura 24-3:** Fuerza de contacto a 20 rpm  
 Realizado por: Carlos Zhigui,2020



**Figura 25-3:** Fuerza de contacto a 30 rpm  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020



**Figura 26-3** Fuerza de contacto a 40 rpm  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

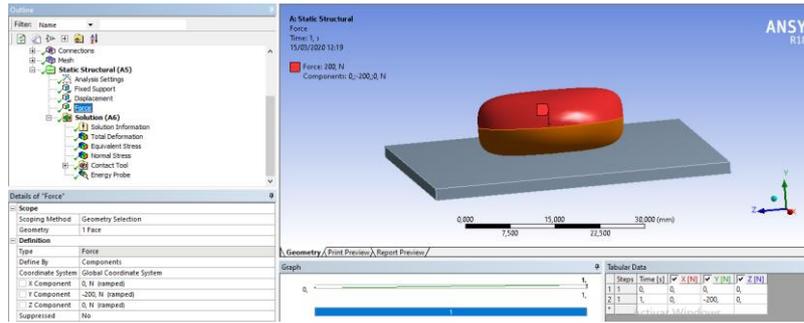
### 3.2.4 Esfuerzo de contacto de una pepa de cacao realizado en Ansys

En esta sección se analiza los esfuerzos de contacto generado en la pepa de cacao tanto en el sentido longitudinal y transversal, aplicando la máxima fuerza a la que se rompe en los dos sentidos y la fuerza máxima de contacto generada en el tambor rotativo.

#### a.) Máximo esfuerzos generados por una fuerza sobre una pepa de cacao en sentido longitudinal.

Con los valores obtenidos de la fuerza ejercida en el contacto, realizado en Adams, se analiza la deformación ejercida por la fuerza usando la teoría de contacto de Hertz, suponiendo un esfuerzo entre un sólido y una placa.

En Ansys se utiliza la opción de análisis estructural y se añaden las propiedades físico-mecánicas de una pepa de cacao según (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015), se añaden las fuerza que se le aplica a la pepa de cacao y las restricciones que se originan del problema, soporte fijo en la plancha y movimiento solo vertical en el sentido de la gravedad de la pepa de cacao, esto se observa en la siguiente figura



**Figura 27-3:** Simulación de una pepa de cacao en Ansys.  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

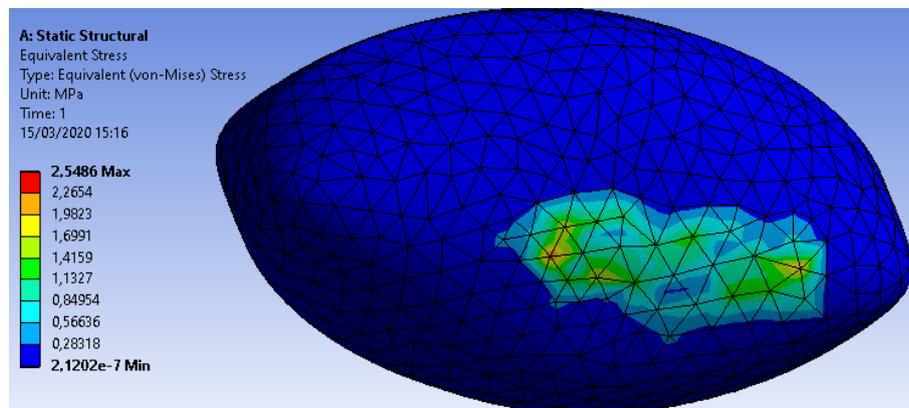
Se analiza el contacto generado por la fuerza de 200 Newton, la máxima para llegar a la rotura y a 30 Newton la máxima fuerza de contacto generada en el tambor rotativo. A continuación, se presentan los resultados en la siguiente tabla.

**Tabla 6-3** Resultados elementos finitos para una pepa de cacao longitudinal

| Fuerza (Newton) | Deformación máxima de la pepa de cacao (mm) | Esfuerzo máximo de Von Mises (MPa) | Profundidad de penetración máxima (mm) | Presión de contacto máxima (MPa) | Energía usada en la deformación (mJ) |
|-----------------|---|------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| 200             | 1,23  | 16,99                              | 0,0025                                 | 30,27                            | 93,25                                |
| 30              | 0,185                                       | 2,54                               | 0,00038                                | 4,54                             | 2,09                                 |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

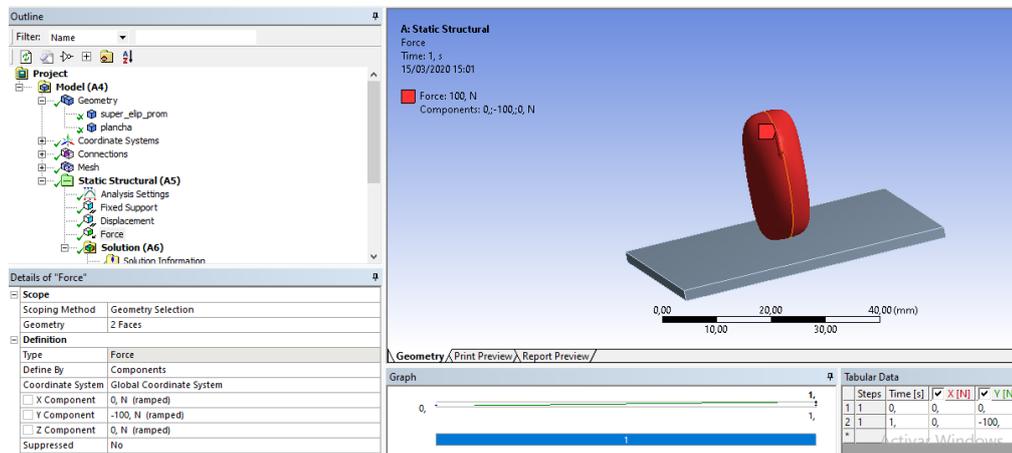
Se va a centrar en la zona de contacto para el caso de una fuerza aplicada de 30 newton. La distribución esfuerzos de Von Mises, está representada en la figura



**Figura 28-3:** Esfuerzo de Von Mises aplicada a la sección longitudinal de una pepa de cacao  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

**b.) Máximo esfuerzos generados por una fuerza sobre una pepa de cacao en sentido transversal**

Se analiza también el efecto de la fuerza aplicada obtenida en la simulación en Adams, aplicada en una pepa de cacao en su sección transversal, como se observa en la siguiente figura.



**Figura 29-3:** Simulación de una pepa de cacao en Ansys aplicada una fuerza en sentido transversal

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

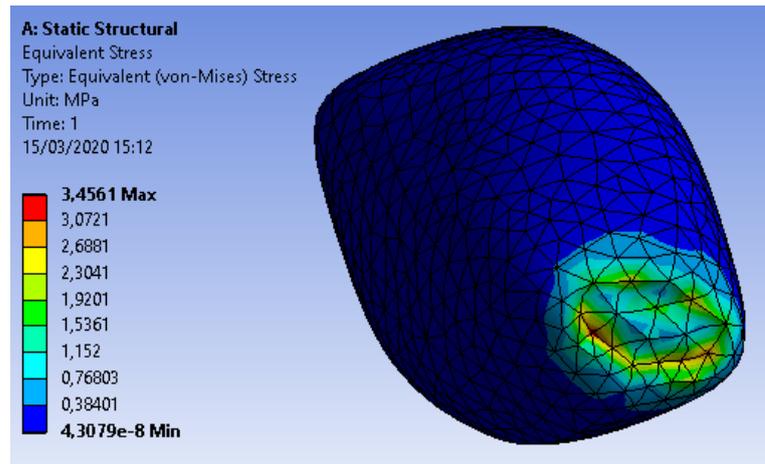
Se analiza el contacto generado por la fuerza de 100 Newton, la máxima para llegar a la rotura cuando se aplica la fuerza en el sentido transversal a la pepa de cacao según (Sarpong Amoah, Ekow Abano, & Kwaku Anyidoho, 2015), y a 30 Newton la máxima fuerza de contacto generada en el tambor rotativo. A continuación, se presentan los resultados en la siguiente tabla.

**Tabla 7-3** Resultados elementos finitos para una pepa de cacao transversal

| Fuerza (Newton) | Deformación máxima de la pepa de cacao (mm) | Esfuerzo máximo de Von Mises (MPa) | Profundidad de penetración máxima (mm) | Presión de contacto máxima (MPa) | Energía usada en la deformación (mJ) |
|-----------------|---|------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| 100             | 0,732                                       | 11,52                              | 0,0013                                 | 19,14                            | 31,655                               |
| 30              | 0,22  | 3,456                              | 0,0004                                 | 5,743                            | 2,849                                |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Al analizar los resultados cuando se aplica una fuerza de 30 Newton en el sentido transversal es mayor cuando se aplica en el sentido longitudinal, pero a la vez están por debajo del punto de rotura de la pepa de cacao. Por ende, al hacer girar el tambor rotativo con una revolución de 8 rpm, no se causará daño a la pepa de cacao.



**Figura 30-3:** Esfuerzo de Von Mises aplicada a una pepa de cacao transversal  
**Realizado por:** Carlos Zhigui, 2020

### 3.3 Consideraciones para el modelado termodinámico del secado de cacao

El modelo de secado se plantea bajo las siguientes consideraciones:

- Se realiza el análisis únicamente de la cámara de secado. Este modelo no tomara en cuenta la generación de aire caliente, porque con los datos de las curvas de secado que se obtendrán permitirán seleccionar la bomba de calor.
- Se considera la transferencia de calor y masa que se produce en las pepas de cacao, efectos de convección, difusión y prevalecen las condiciones adiabáticas en la cámara de secado, es decir, se desprecia la transferencia de calor con el exterior.
- Se consideran constantes a los coeficientes de transferencia de masa y calor.
- La generación de aire caliente hace circular el gas a velocidad constante a través del cilindro.
- El calor específico, la conductividad térmica y la difusividad efectiva se estiman mediante correlaciones.
- En el proceso de secado el volumen de la pepa de cacao se considera constante a través del tiempo.
- Para el modelado de la transferencia de calor y masa se considera unidimensional y a la pepa de cacao se la considera como una esfera.

### 3.3.1 Modelo numérico del proceso de secado sin considerar la humedad del aire.

#### a.) Ecuaciones para la transferencia de masa.

La ecuación de la transferencia de masa está basada en la segunda Ley de Fick ecuación (37):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla * (Def f \nabla X)$$

La ecuación describe el cambio de humedad por unidad de tiempo dentro del producto. Se lo va utilizar para fines de diseño en los casos que el mecanismo de control de secado es la difusión de la humedad.

La transferencia de calor se basa en la ecuación de conducción de calor de Fourier (38):

$$\rho * Cp \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla * (k \nabla T)$$

Para la transferencia de calor y masa de las pepas de cacao se las considera como una esfera y unidimensional, por ello se va a desarrollar el modelo en coordenadas esféricas y también se le asignaron condiciones de frontera, según (Koua, Ekoun Koffi, & Gbaha, 2019) y (Perussello, Mariani, & Camargo do Amarante, 2012), ecuación (39).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{Def f}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \rightarrow \frac{\partial X}{\partial t} = Def f \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right]$$

El contenido de humedad depende de las condiciones iniciales de frontera en la superficie y en el centro de la pepa de cacao, y se establece de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$
$$-Def f \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} = hmc(X - Xe)$$

Dónde:

hm=Coeficiente de transferencia de masa (m/s)

Xe=Humedad de equilibrio en base seca  $\left( \frac{Kg_{H2O}}{Kg_{solidos secos}} \right)$

Para resolver las ecuaciones diferenciales parciales planteadas, para la transferencia de masa se recurre a los métodos numéricos, mediante la técnica de diferencias finitas, utilizando el método

de Crank –Nicolson, a continuación, se presentan las ecuaciones generadas por este método, donde los índices j representan a la variable del tiempo y los índices i representan a la variable espacial r:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{X_i^{j+1} - X_i^j}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial X}{\partial r} = \frac{1}{2} \left( \frac{X_{i+1}^j - X_{i-1}^j}{2\Delta r} + \frac{X_{i+1}^{j+1} - X_{i-1}^{j+1}}{2\Delta r} \right)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{X_{i+1}^j - 2X_i^j + X_{i-1}^j}{\Delta r^2} + \frac{X_{i+1}^{j+1} - 2X_i^{j+1} + X_{i-1}^{j+1}}{\Delta r^2} \right)$$

Si en la ecuación (39) se sustituye los términos en derivadas parciales por sus equivalentes dados en diferencias finitas se obtiene:

$$X_{i-1}^{j+1} \left( D - \frac{f}{r_i} \right) - 2X_i^{j+1} (1 + D) + X_{i+1}^{j+1} \left( D + \frac{f}{r_i} \right) = X_{i-1}^j \left( \frac{f}{r_i} - D \right) + 2X_i^j (D - 1) - X_{i+1}^j \left( D + \frac{f}{r_i} \right) \quad (98)$$

Esta ecuación es aplicable para i=2 hasta i=nr-1.

Dónde:

$$D = \frac{Def f * \Delta t}{\Delta r^2}$$

$$f = \frac{Def f * \Delta t}{\Delta r}$$

nr= número de puntos que definen el radio de la esfera

La ecuación (92) no está definida para valores de i=1, o sea, en r=0 que representa el centro de la esfera, existe una discontinuidad en la ecuación diferencial que debe resolverse, para ello hay que evaluar el término  $\frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r}$  para r=0, donde se obtiene una indeterminación, para resolver este problema se aplica la regla de L Hopital:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} = 2 * \frac{\partial^2 X}{\partial r^2}$$

Al sustituir (39) en la ecuación anterior, para el punto situado en el centro de la esfera i=1, r=0

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 3 * Def f * \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (101)$$

La ecuación (93) solo es válida para el centro de la esfera i=1, r=0, para ello se aplica el método de Crank Nicolson para discretizar la ecuación:

$$\frac{X_1^{j+1} - X_1^j}{\Delta t} = 3 * Deff * \frac{1}{2} \left( \frac{X_2^j + X_1^j + X_0^j}{\Delta r^2} + \frac{X_2^{j+1} + X_1^{j+1} + X_0^{j+1}}{\Delta r^2} \right) \quad (102)$$

Como existe simetría en el perfil de la humedad en base seca de la esfera  $X_2^j = X_0^j$  y  $X_2^{j+1} = X_0^{j+1}$  la ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$3DX_2^{j+1} - (1 + 3D)X_1^{j+1} = -3DX_2^j + (3D - 1)X_1^j \quad (101)$$

Para el último punto nodal  $i=nr$  la ecuación resultante es.

$$\begin{aligned} -DX_{i-1}^{j+1} + \left( \frac{1+D+(D*B+\Delta r)}{R} + \frac{D*B*\Delta r}{i*R} \right) X_i^{j+1} \\ = DX_{i-1}^j + \left( \frac{1-D-(D*B+\Delta r)}{R} - \frac{D*B*\Delta r}{i*R} \right) X_i^j + 2 * \left( \frac{D*B*dr}{R} + \frac{D*B*dr}{i*R} \right) * Xe \quad (103) \end{aligned}$$

Estas ecuaciones quedan escritas de la forma matricial de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} -(1+3D) & 3D & 0 & 0 & 0 \\ \left(D - \frac{f}{r_i}\right) & -2(1+D) & \left(D + \frac{f}{r_i}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \left(D - \frac{f}{r_i}\right) & -2(1+D) & \left(D + \frac{f}{r_i}\right) \\ 0 & 0 & 0 & -D & \left( \frac{1+D+(D*B+\Delta r)}{R} + \frac{D*B*\Delta r}{i*R} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^{j+1} \\ X_2^{j+1} \\ \vdots \\ X_{nr-1}^{j+1} \\ X_{nr}^{j+1} \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} (1+3D)X_1^j - 3DX_2^j \\ \left(\frac{f}{r_i} - D\right)X_{i-1}^j + 2(D-1)X_i^j - \left(D + \frac{f}{r_i}\right)X_{i+1}^j \\ \vdots \\ DX_{i-1}^j + \left( \frac{1+D+(D*B+\Delta r)}{R} + \frac{D*B*\Delta r}{i*R} \right) X_i^j + 2 * \left( \frac{D*B*dr}{R} + \frac{D*B*dr}{i*R} \right) * Xe \end{pmatrix} \end{aligned}$$

## b.) Ecuaciones para la transferencia de calor

Para la transferencia de calor se le asigna las siguientes condiciones de contorno a la ecuación de calor de Fourier según (Zabalaga Davila, 2016), ecuación (42).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho * Cp * r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho * Cp} \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right]$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = ht(Tp - Ta) + hfg * Deff * \rho * \frac{\partial X}{\partial r}$$

Dónde:

ht=Coeficiente de transferencia de calor  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

Tp=Temperatura del producto (Kelvin)

Ta= Temperatura del aire (Kelvin)

hfg= Entalpía de vaporización (J/Kg)

$\rho$ = Densidad del producto (Kg/m<sup>3</sup>)

Para resolver las ecuaciones diferenciales parciales planteadas, para la transferencia de calor se recurre a los métodos numéricos, mediante la técnica de diferencias finitas, utilizando el método de Crank –Nicolson, a continuación, se presentan las ecuaciones generadas por este método, donde los índices j representan a la variable del tiempo y los índices i representan a la variable espacial r:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i+1}^j - T_{i-1}^j}{2\Delta r} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{2\Delta r} \right)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\Delta r^2} \right)$$

Al sustituir en la ecuación (42) el equivalente en sus ecuaciones de diferencias finitas queda expresado de la siguiente forma:

$$T_{i-1}^{j+1} \left( DT - \frac{ft}{r_i} \right) - 2T_i^{j+1} (1 + DT) + T_{i+1}^{j+1} \left( DT + \frac{ft}{r_i} \right) = T_{i-1}^j \left( \frac{ft}{r_i} - DT \right) + 2T_i^j (DT - 1) - T_{i+1}^j \left( DT + \frac{ft}{r_i} \right) \quad (104)$$

Esta ecuación es aplicable para i=2 hasta i=nr-1.

Dónde:

$$def t = \frac{k}{\rho * Cp}$$

$$DT = \frac{def t * \Delta t}{\Delta r^2}$$

$$ft = \frac{def t * \Delta t}{\Delta r}$$

nr= número de puntos que definen el radio de la esfera

De igual forma como se procedió a realizar las operaciones con la humedad, se procede a resolver con la Temperatura, donde para el nodo central i=1, la ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$3DT * T_2^{j+1} - (1 + 3DT)T_1^{j+1} = -3DT * T_2^{j+1} + (3DT - 1)T_1^{j+1} \quad (105)$$

Para el último punto nodal i=nr la ecuación resultante es.

$$T_i^{j+1} = T_i^j - \frac{\Delta r * ht}{k} (T_i^j - Ta) + hfg * Def f * \rho * \frac{X_i^{j+1} - X_i^j}{k} \quad (106)$$

Estas ecuaciones quedan escritas de la forma matricial de la siguiente forma:

$$\begin{vmatrix} -(1 + 3DT) & 3DT & 0 & 0 & 0 \\ \left(DT - \frac{ft}{r_i}\right) & -2(1 + DT) & \left(DT + \frac{ft}{r_i}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \dots \dots & \dots \dots & \dots \dots & 0 \\ 0 & 0 & \left(DT - \frac{ft}{r_i}\right) & -2(1 + DT) & \left(DT + \frac{ft}{r_i}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T_1^{j+1} \\ T_2^{j+1} \\ \vdots \\ T_{nr-1}^{j+1} \\ T_{nr}^{j+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (1 + 3DT)T_1^j - 3DT * T_2^j \\ \left(\frac{ft}{r_i} - DT\right)T_{i-1}^j + 2(DT - 1)T_i^j - \left(DT + \frac{ft}{r_i}\right)T_{i+1}^j \\ \vdots \\ \vdots \\ T_i^j - \frac{\Delta r * ht}{k} (T_i^j - Ta) + hfg * Def f * \rho * \frac{X_i^{j+1} - X_i^j}{k} \end{vmatrix}$$

Las ecuaciones diferenciales parciales discretizadas en forma de matrices, se resolvió en MATLAB, junto con las condiciones iniciales y de contorno, que hizo posible obtener la evolución de la temperatura y la humedad dentro de la pepa de cacao en función del tiempo. Por lo tanto, es posible evaluar la influencia del aire en la temperatura en el tiempo de secado.

### c.) Estimación del coeficiente de transferencia de calor y de masa

Para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor y masa se utilizaron las formulas de la sección 2.7.1, ecuaciones desde 47 al 52

**Tabla 8-3** Coeficientes de transferencia de calor y masa

| Parámetro                                   | Símbolo        | Valor                  | Unidad            |
|---|----------------|------------------------|-------------------|
| Temperatura ingreso del producto            | To             | 25                     | °C                |
| Temperatura máxima del aire de secado       | Tex            | 50                     | °C                |
| Temperatura media                           | Tm             | 37,5                   | °C                |
| Entalpía de vaporización                    | hfg            | 2412000                | J/Kg              |
| Conductividad térmica del aire <sup>a</sup> | k <sub>∞</sub> | 0.02644                | $\frac{W}{m K}$   |
| Viscosidad del aire <sup>a</sup>            | μ <sub>∞</sub> | 1,91x10 <sup>-5</sup>  | Pa.s              |
| Número de Prandtl <sup>a</sup>              | Pr             | 0,726                  |                   |
| Caudal del aire                             | Ca             | 0,15                   | $\frac{m^3}{s}$   |
| Diámetro del tambor                         | Dtambor        | 0,7                    | m                 |
| Velocidad del aire                          | V <sub>∞</sub> | 0,76                   | $\frac{m}{s}$     |
| Densidad del aire de secado                 | ρ <sub>∞</sub> | 1,13                   | $\frac{Kg}{m^3}$  |
| Diámetro del producto                       | dp             | 15,6*10 <sup>-3</sup>  | m                 |
| Número de Reynolds                          | Re             | 707,26                 |                   |
| Número de Nusselt                           | Nu             | 18,06                  |                   |
| Difusividad del producto <sup>b</sup>       | Deff           | 4,89*10 <sup>-10</sup> | $\frac{m^2}{s}$   |
| Número de Schmidt                           | Sc             | 34452                  |                   |
| Número de Sherwood                          | Sh             | 583,59                 |                   |
| Coeficiente de transferencia de masa        | hm             | 1,82*10 <sup>-5</sup>  | $\frac{m}{s}$     |
| Coeficiente de transferencia de calor       | ht             | 30,62                  | $\frac{W}{m^2 K}$ |

Fuente: <sup>a</sup> (Cengel Y. A., 2007), <sup>b</sup> (Hii, Law, & Law, 2013)**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

**d.) Difusividad, Conductividad Térmica y Calor específico del producto en función de la temperatura**

En las ecuaciones (8) -(9) y (10) se establecen las fórmulas del calor específico, la conductividad térmica y la Difusividad de las pepas de cacao en función de la temperatura, estas fórmulas se deben ingresar en Matlab, junto con las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor y masa, para ello se realiza el siguiente algoritmo para que varíe su valor en función de la temperatura.

```
s=0;
for i=1:nr;
s=s+(T(j,i));
end
Ta=s/(nr);
k=2e-5*(Ta)^2-0.0111*Ta+2.14;
Cp=0.1569*(Ta)^2-102.51*Ta+18806
Deff=12e-4*exp(-38000/(Ru*Ta))
```

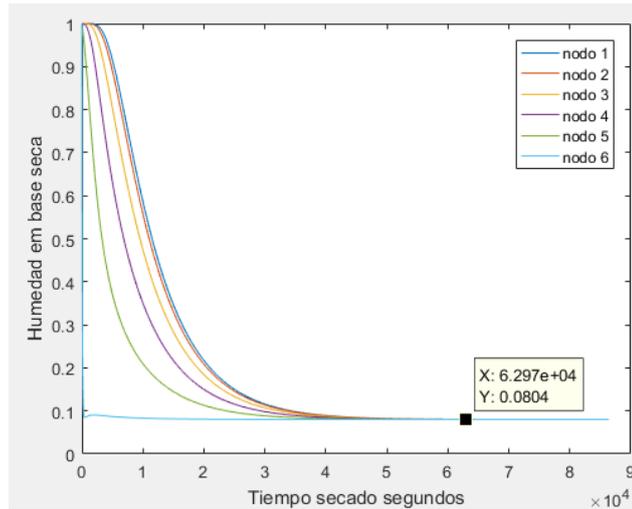
**e.) Densidad del producto como función de la humedad en base seca**

En la ecuación (5) se obtuvo la densidad en función de la humedad en base seca, de igual manera se procede a realizar un algoritmo para que asigna la difusividad de cacao en función de su humedad:

```
for i=1:nr;
s2=s2+ (X(j, i));
end
Xa=s2/nr;
d=698,89*Xa+698,89
```

**f.) Curvas de la variación de la temperatura y humedad de las pepas de cacao en función del tiempo**

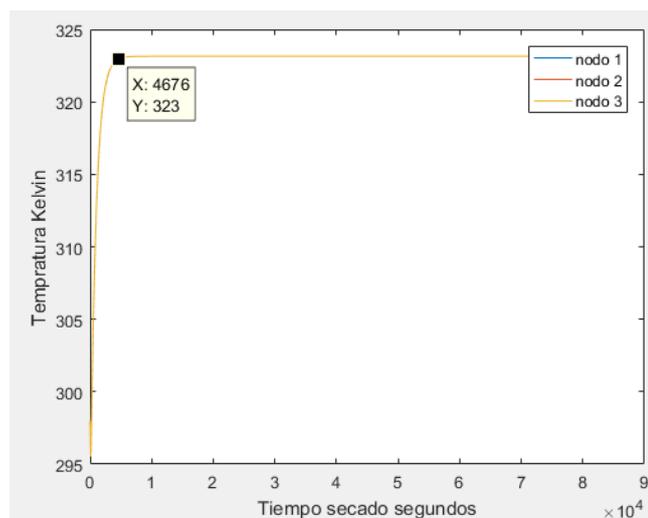
Establecido los parámetros de los coeficientes de transferencia de calor y masa, la difusividad, el calor específico, la conductividad térmica en función de la temperatura y la densidad del producto en función de su humedad en base seca y las matrices para la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales, se ingresa en Matlab para obtener las curvas de la variación de la Temperatura y la humedad en cada punto de acuerdo a las divisiones que se hicieron en el radio de la pepa de cacao (esfera) el cual para este caso fue de (nr=6), esto es sin considerar el efecto de la humedad del aire de secado, además la humedad de equilibrio (Xe) es de 0,08 y la temperatura de secado permanece constante, a continuación se presentan las gráficas obtenidas de la temperatura y humedad.



**Gráfico 4-3:** Variación de la humedad de cada nodo de la pepa de cacao con aire seco  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

A la pepa de cacao se la dividió en 6 puntos de los cuales el nodo 1 representa al centro de la pepa de cacao y el nodo 6 representa la parte externa de la pepa de cacao, se pudo observar en la gráfica que la humedad decrece rápidamente en el extremo de la pepa de cacao pero llegando a la humedad de equilibrio, pero en los puntos internos de la pepa de cacao la humedad demora en llegar al equilibrio, en este estudio se considera seca la pepa de cacao cuando la parte central de la misma llegue a la humedad de equilibrio, es decir el nodo 1, según la gráfica llega a la humedad de equilibrio en un tiempo de 62970 segundos (17,5 horas).

A continuación, se presenta la gráfica de la variación de temperatura en función del tiempo de secado.



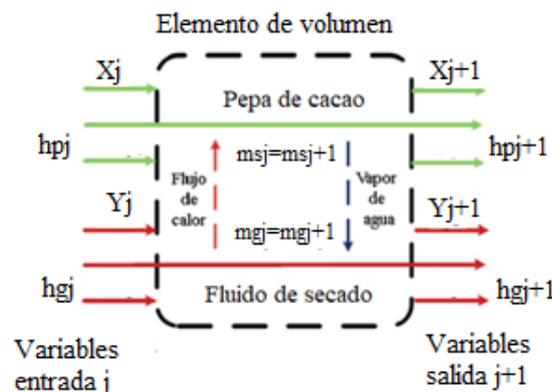
**Gráfico 5-3:** Variación de la Temperatura de cada nodo de la pepa de cacao con aire seco  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

La gráfica indica que existen tres líneas, pero solo aparece una debido a que la pepa de cacao alcanza en todos los nodos la temperatura al mismo tiempo y que para llegar a la temperatura del aire de secado le toma 4676 segundos (1,3 horas).

En este análisis no influye la cantidad de masa de cacao que se desea secar, porque el modelo depende del radio promedio de una sola pepa de cacao, su densidad y el flujo de aire de secado, para realizar un análisis más detallado se debe de considerar la influencia de la humedad del aire de secado.

### 3.3.2 Modelo termodinámico del secado de cacao considerando la humedad del aire

Para el modelo termodinámico del secado de cacao se establece un volumen de control, según (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018)



**Figura 31-3:** Volumen de control para el proceso de secado  
Fuente: (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018)

De acuerdo al volumen de control establecido, las variables correspondientes a la humedad del aire de secado se obtienen según las propiedades del aire húmedo. Para establecer la transferencia de calor entre el aire de secado y las pepas de cacao dentro del volumen de control se considera lo que indica (Ponce de la Cruz, Royo, & García Reynoso, 2018), donde los elementos de volumen están limitados por dos secciones llamadas de entrada (empleando el subíndice  $j$ ) y salida con el subíndice  $(j+1)$ . Las condiciones de alimentación al secador son conocidas, el resto de los elementos de volumen se van resolviendo en serie, debido a que las variables de entrada son conocidas y, por lo tanto, a partir de las ecuaciones planteadas se obtendrán las de salida.

Las ecuaciones del Modelo Matemático de la Transferencia de Calor y Masa sin considerar la humedad del aire de secado realizado anteriormente, se le añaden las propiedades del aire húmedo y el balance de masa en un secador:

- Flujo de agua a evaporar

$$\dot{m}a_{j+1} = mS * \left( \frac{X_{j+1,np} - X_{j,np}}{\Delta t} \right) \quad (107)$$

- Humedad absoluta a la salida del volumen de control

$$Y_{j+1} = \frac{(\dot{m}a_{j+1} - \dot{m}a_j) + G * Y_j}{G} \quad (108)$$

- La temperatura del aire de secado a la salida del volumen de control es la siguiente

$$Tg_{j+1} = \frac{h - 2501,6 * Y_{j+1}}{Cpa + 1,795 * Y_{j+1}} \quad (109)$$

- El flujo del producto se define como

$$\dot{m}p_{j+1} = \dot{m}s_{j+1} + \dot{m}a_{j+1} \quad (110)$$

- La Presión de saturación:

$$Pg_{j+1} = e^{\frac{c1}{Tg_{j+1}} + C2 + C3 * Tg_{j+1} + C4 * Tg_{j+1}^2 + C5 * Tg_{j+1}^3 + C6 * Tg_{j+1}^4 + C7 * \ln Tg_{j+1}} \quad (111)$$

- La Humedad relativa:

$$HR_{j+1} = \frac{Y_{j+1} * Pt}{(0,622 + Y_{j+1}) * Pg_{j+1}} \quad (112)$$

- La entalpia de vaporización

$$hfg_{j+1} = -2,37 * T_{j+1,np} + 2501,6 \quad (113)$$

- Flujo de calor utilizado para calentar el agua contenida dentro de la pepa de cacao

$$Q1_{j+1} + Q3_{j+1} = \dot{m}s_{j+1} * X_{j+1,np} * (hs_{j+1} - hs_j) \quad (114)$$

- Flujo de calor utilizado para vaporizar el agua

$$Q2_{j+1} = \dot{m}a_{j+1} * hfg_{j+1} \quad (115)$$

- Flujo de calor utilizado para calentar el vapor de agua que abandona el material

$$Q4_{j+1} = \dot{m}a_{j+1} * (hgp_{j+1} - hg_{j+1}) \quad (116)$$

- El flujo de calor utilizado para calentar las pepas de cacao seco

$$Q5_{j+1} = \dot{m}p_{j+1} * Cp_{j,np} (T_{j+1,np} - T_{j,np}) \quad (117)$$

- Flujo de calor total

$$Qp_{j+1} = Q1_{j+1} + Q2_{j+1} + Q3_{j+1} + Q4_{j+1} + Q5_{j+1} \quad (118)$$

**a.) Parámetros iniciales utilizados para el modelo matemático considerado la humedad del aire de secado**

A continuación, se indican las variables de ingreso al volumen de control, las cuales son necesarias para desarrollar el programa realizado en Matlab.

**Tabla 9-3** Correlaciones de los coeficientes de transferencia de calor y masa

| Parámetro                               | Símbolo | Valor    | Unidad |
|---|---------|----------|--------|
| Altura sobre el nivel del mar           | z       | 0        | m      |
| Humedad relativa al ingreso del secador | HR      | 16       | %      |
| Entalpia de vaporización del agua       | hfg     | 2442,7   | KJ/Kg  |
| Entalpia del vapor saturado             | hg      | 2546,2   | KJ/Kg  |
| Entalpia del líquido saturado           | hs      | 104,1898 | KJ/Kg  |
| Masa de caco seco a obtener             | ms      | 19,5     | Kg     |

**Realizado por:** Carlos Zhigui

A manera de resumen, se puede seguir el siguiente procedimiento para determinar el flujo de aire de secado y el calor suministrado por la bomba de calor:

- 1.) Se ingresa la Humedad en base seca inicial  $X_o$  y la humedad que se desea obtener o humedad de equilibrio  $X_e$ , esto se encuentra en el modelo de secado establecido anteriormente
- 2.) Se ingresa la temperatura de inicial del producto  $T_p$  y la Temperatura del aire de secado de ingreso  $T_{ex}$ , esto se estableció en el modelo de secado anteriormente.
- 3.) El número de puntos que se va a dividir la pepa de cacao en este caso  $n_r=6$  y el número de puntos que se va a dividir el tiempo, además del tiempo máximo que se estime para el secado
- 4.) La altura sobre el nivel que se encuentra el secador en este caso se tomara cero metros sobre el nivel del mar, por realizarse en la Ciudad de Machala, provincia de el Oro.
- 5.) La humedad relativa de ingreso del secador la cual es del 16%, la cual es la humedad de salida de la bomba de calor
- 6.) El radio promedio de la pepa de cacao que para este caso es  $7,8 \cdot 10^{-3}$  metros

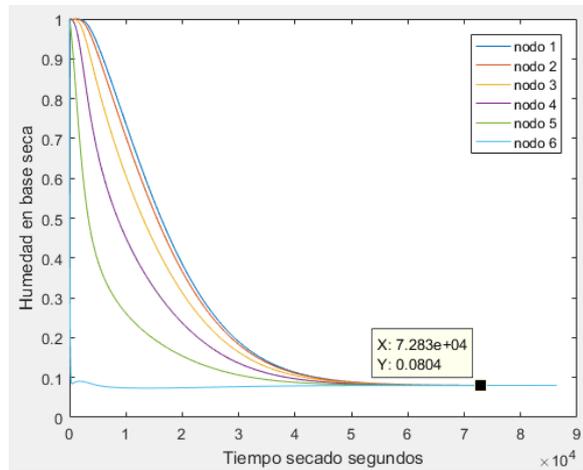
- 7.) La masa de cacao seco a obtener 19,5 Kg, esto se obtiene de las dimensiones del tambor, calculado previamente, si bien la masa calculada fue de 23,56 Kg, pero esto es cuando el cacao está húmedo.
- 8.) El caudal de ingreso del aire para este caso se iniciará con 0,15 m<sup>3</sup>/s
- 9.) El punto de análisis del radio de la pepa de cacao np
- 10.) El diámetro del tambor (Dtambor) el cual es de 0,7 metros
- 11.) Con estos valores se calcula la humedad absoluta del aire, la cual se considera para el volumen de control.
- 12.) Con los valores de la Humedad relativa del aire y de la temperatura de ingreso del aire de secado se calcula la entalpía del aire, la cual se la considera constante en el proceso de secado
- 13.) Se calcula la entalpía de vaporización del agua, la entalpía del vapor saturado y la entalpía del líquido saturado.
- 14.) Las formulas se ingresan en el Matlab, para obtener la curva de secado, el comportamiento de la Temperatura de la pepa de cacao, la humedad específica del aire, la Temperatura del aire de secado, la Humedad relativa, el flujo de calor utilizado para vaporizar el agua que abandona la pepa de cacao y el flujo de calor total que se necesita para la bomba de calor, estos cálculos están realizados en el programa Matlab y se presentan en el Anexo B y C

**b.) Gráficas generadas del proceso termodinámico considerando la humedad del aire**

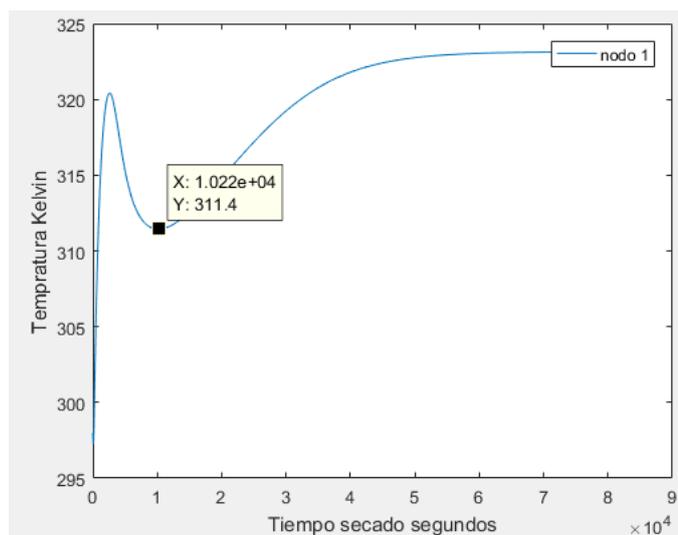
A continuación, se presentan las gráficas generadas de los cálculos realizados en Matlab:

- En la figura 37-3 se presenta la humedad en cada punto de la pepa de cacao idealizada, donde el nodo 1 representa el centro y el nodo 6 la parte externa, se puede observar que la humedad varía según el nodo de análisis y el tiempo en alcanzar la humedad de equilibrio es de 72830 segundo (20,23 horas), esto se obtiene con un caudal de aire de secado de 0,15 m<sup>3</sup>/s (318 CFM).
- En la figura 38-3, se aprecia la variación de la temperatura de la pepa de cacao en función del tiempo, la temperatura de la pepa de cacao alcanza la temperatura del aire de secado a los 320,4 segundos (0,08 horas), para luego descender a los 311 kelvin (38 grados centígrados), es donde se puede apreciar el efecto de la humedad del aire porque cede parte del agua contenida en la pepa de cacao, al aire de secado, para posteriormente igualarse a la temperatura

del aire de secado conforme va perdiendo humedad la pepa de cacao, el mismo efecto ocurre en todos los nodos por igual.

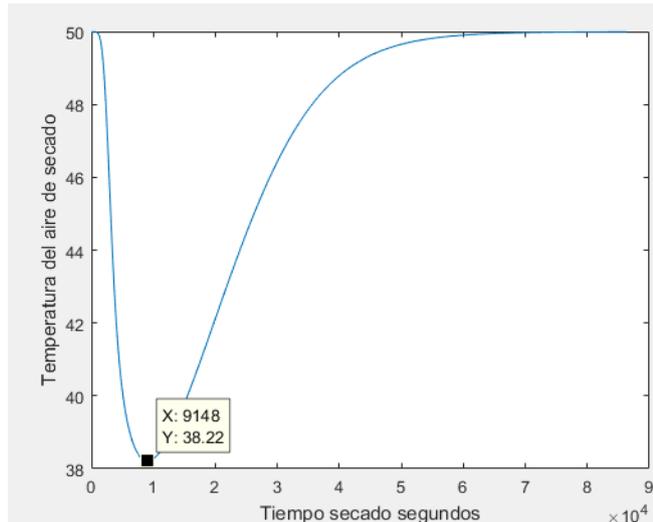


**Gráfico 6-3:** Variación Humedad del cacao en función del tiempo considerando aire húmedo.  
Realizado por: Carlos Zhigui



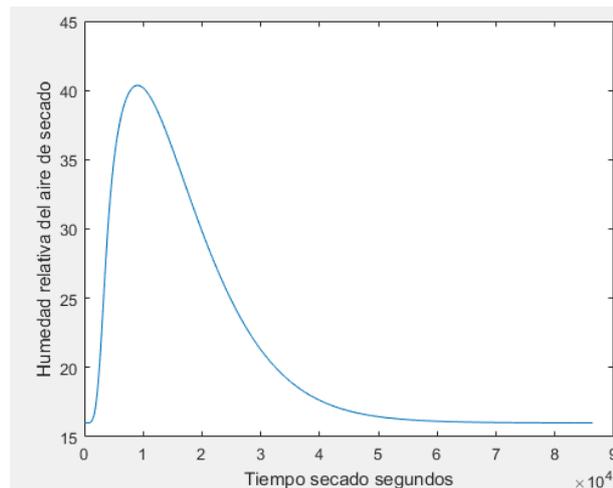
**Gráfico 7-3:** Temperatura de la pepa de cacao considerando la humedad.  
Realizado por: Carlos Zhigui.

- La temperatura del aire de secado figura 39-3, donde se puede apreciar el efecto de transferir la humedad del aire de secado con la humedad contenida en la pepa de cacao, donde se iguala a una temperatura de 38,22 grados centígrados.



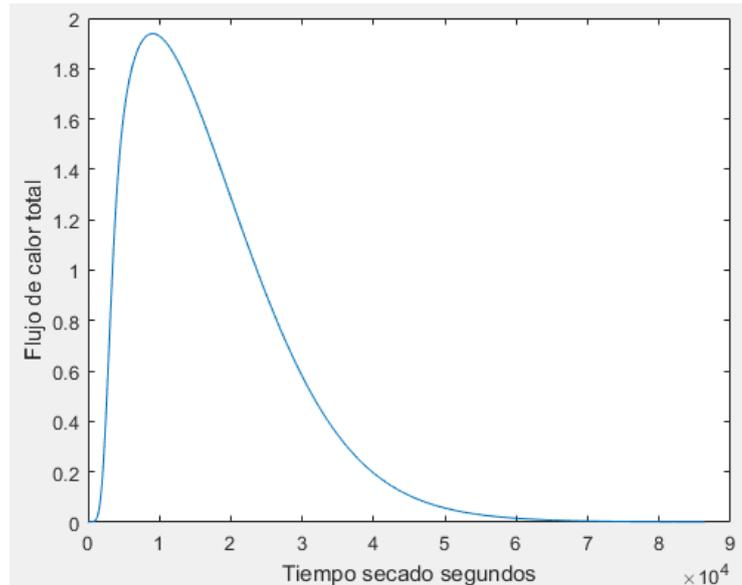
**Gráfico 8-3:** Temperatura del aire de secado en función del tiempo  
**Realizado por:** Carlos Zhigui.

- La humedad relativa del aire máxima que absorbe el aire en el proceso de secado es de 40 %.



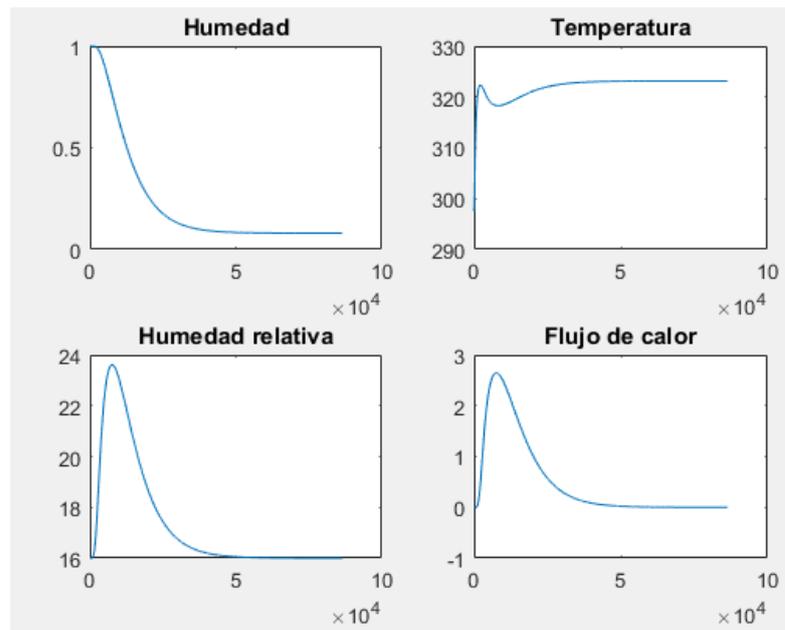
**Gráfico 9-3:** Humedad relativa del aire de secado en función del tiempo.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui, 2020

- El flujo de calor necesario para extraer la humedad contenida en las pepas de cacao se aprecia en la siguiente figura, donde el flujo de calor máximo es de 1,94 KW, esto ocurre a los 8996 segundos (2,49 horas). Si bien según los cálculos realizados el flujo de calor no es constante, según varía la humedad de las pepas de cacao, para el caso del presente proyecto el flujo de la bomba de calor es constante, se procede a estimar el valor medio, esto se logra con el valor medio cuadrático (RMS), con esto se determina que el flujo de calor medio es de 0,83KW para obtener 19,5 Kg de cacao seco en 20,23 horas, con un caudal de 0,15 m<sup>3</sup>/s (318 CFM).



**Gráfico 10-3:** Flujo de calor total entre el aire de secado y las pepas de cacao.  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

- A continuación, se presentan graficas cuando el flujo de aire de secado es de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$



**Gráfico 11-3:** Variación de los parámetros con un caudal de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Con el flujo de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (1059 CFM), los demás valores de ingreso se van a mantener iguales, con este dato el tiempo de secado reduce a 65510 segundos (18,19 horas), esto se analiza en el centro de la pepa de caco, en la temperatura existe un descenso de 318 Kelvin (45 grados), la máxima humedad relativa que extrae el aire de secado 23,61 % y el máximo flujo de calor es de 2,65 KW el cual da un valor medio de 0,94 KW

El criterio de variar el caudal de aire es debido a que los datos técnicos que influyen en una bomba de calor es el flujo de calor requerido y su caudal de aire, para finalizar se presenta una tabla donde indica los valores de tiempo de secado, Humedad relativa máxima que alcanza el aire de secado y el flujo de calor requerido para el proceso de secado

**Tabla 10-3** Tiempo de secado, humedad relativa y flujo de calor con diferentes valores de caudal de aire.

| <b>Caudal de aire de secado (m<sup>3</sup>/s)</b> | <b>Tiempo de secado Horas</b> | <b>Humedad relativa máxima (%)</b> | <b>Flujo de calor máximo (KW)</b> | <b>Flujo de calor medio (KW)</b> |
|---|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 0,15  | 20,23                         | 40                                 | 1,94                              | 0,83                             |
| 0,25  | 19,26                         | 30,9                               | 2,27                              | 0,88                             |
| 0,5   | 18,19                         | 23,61                              | 2,65                              | 0,94                             |
| 1   | 17,71                         | 19,9                               | 2,91                              | 0,97                             |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

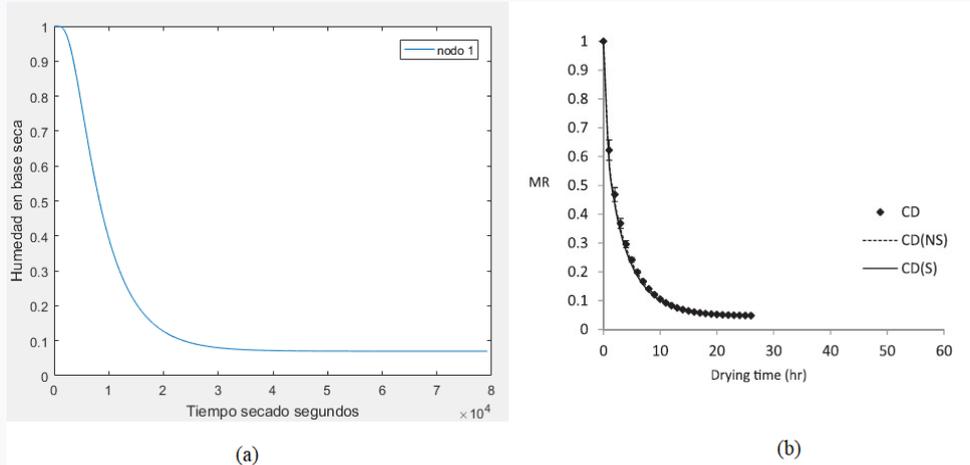
La observar los valores de la tabla 11-3 se aprecia que al aumentar el caudal de aire se reduce el tiempo de secado, considerando una temperatura del aire de ingreso del aire de secado de 50 °C, que es la máxima recomendada para este proceso, pero a la vez se necesita más flujo de calor, estos parámetros que están ligados directamente a la economía del equipo. A mayor caudal y flujo de calor, mayor será el costo operativo por kilogramo de producto seco. Observando la tabla se verifica que con un caudal entre 0,15 a 0,5 m<sup>3</sup>/s se produce una reducción de 2 horas, mientras que al seguir aumentando el caudal el tiempo de secado no reduce demasiado y a la vez el flujo de calor aumenta.

Con estos datos de flujo de calor se procede a seleccionar la bomba de calor, por ser un prototipo y lo que se pretende es analizar las curvas de secado se elige para un flujo de calor de 3 KW que al convertirlo en BTU/h da 10232, con este criterio se selecciona una bomba de calor comercial y la más cercana al valor estimado es de 12000 BTU/h.

Con lo ahora diseñado las dimensiones de la cámara de secado serán de diámetro de 70 cm y la longitud del tambor de 50 cm, la masa máxima a obtener es de 19,5 Kg de cacao seco en 20,23 horas si bien la masa a obtener es poco comparada con la cantidad de energía requerida lo que se desea validar en esta tesis es el modelo obtenido.

### c.) Comparación de las curvas de secado obtenidas con otro estudio realizado

A continuación, se presenta la diferencia en las gráficas obtenidas de la humedad y la temperatura con el modelo realizado (a) y las gráficas obtenidas en un estudio realizado en Malaysia (b) por los autores (Hii, Law, & Law, 2013)



**Gráfico 12-3:** Comparación entre las curvas de secado con respecto a la humedad  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

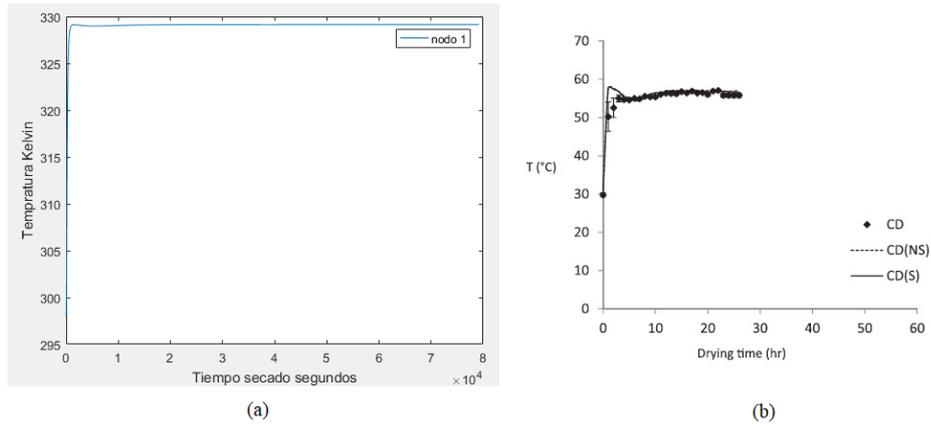
En el estudio en el eje Y, MR representa la relación de humedad y es adimensional relacionada por la siguiente fórmula:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (119)$$

Las siglas CD representa al estudio realizado a temperatura constante con un valor de 56 °C, y una humedad relativa inicial del aire de 14,6 % , las siglas CD(NS) hacen referencia a temperatura constante sin contracción, es decir que el volumen de la pepa de cacao permanece constante y las siglas CD(S) considera la contracción en las pepas de cacao, además estas gráficas fueron considerando una velocidad del aire de secado de  $4,6 \frac{m}{s}$  y una muestra de 0,7 Kg.

Al comparar las gráficas de humedad el tiempo en que alcanza la humedad de equilibrio es de 25 horas mientras en el modelo realizado es de 16,22 horas.

De igual manera se comparó las curvas de temperatura de la pepa de cacao con el modelo realizado (a) y con el estudio realizado en Malaysia (b), en la que alcanza la temperatura del aire de secado el modelo lo realiza en 0,49 horas mientras en el estudio realizado aproximadamente lo obtiene en 1 hora. Lo que se tiene en común es que las gráficas obtenidas en el estudio son similares al modelo realizado.



**Gráfico 13-3:** Comparación entre las curvas de secado con respecto a la temperatura.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

### 3.4 Análisis de la bomba de calor

En el cálculo termodinámico de la transferencia de calor y masa se estableció que se utilizará una bomba de calor de 12000 BTU, para esto se utilizó un aire acondicionado tipo ventana marca LG Modelo LWC123CSMK1, refrigerante que usa es el R22, para establecer si el modelo seleccionado cumplirá las condiciones de secado de cacao, se va a realizar un análisis mediante los cálculos pertinentes respecto al estado actual de la bomba de calor para secado de cacao, y así comprobar los resultados obtenidos con la información adquirida a través de las pruebas realizadas.



**Figura 32-3:** Aire acondicionado tipo ventana  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

#### 3.4.1 Análisis termodinámico del sistema.

La bomba de calor se analizará en base al ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, se tomará en cuenta la temperatura ambiente de 25 °C, la cual es la temperatura promedio de la Ciudad de Machala, y se tomaran datos del funcionamiento de la bomba de calor, para después pasarlos al diagrama de Mollier para determinar si está funcionando correctamente, así como también conocer el rendimiento del equipo.

Los datos termodinámicos del refrigerante R22 y el aire se obtienen del programa Engineering Equation Solver (EES), con el fin de determinar resultados más confiables.

Los datos que se obtuvieron del funcionamiento de la bomba de calor fueron los siguientes:

- Presión manométrica de alta 1963 KPa
- Presión manométrica en el lado de baja 515 KPa
- Temperatura de subenfriamiento: 279 K
- Temperatura de recalentamiento: 323 K
- Potencia de enfriamiento 3,52 KW

**a.) Definición de cada punto del diagrama idealmente**

Se define cada punto del diagrama con ecuaciones termodinámicas que se incluyen en el programa EES, con la finalidad de estimar el dato del flujo másico del refrigerante.

Se consideran los puntos que se han definido en la teoría sobre el diagrama, que son los siguientes:

- 1) Entrada al compresor
- 2) Entrada al condensador
- 3) Entrada a la válvula de expansión
- 4) Entrada al evaporador

Con el fin de situar cada punto del diagrama P-h se analiza su proceso termodinámico, teniendo en cuenta que se está trabajando sobre un ciclo ideal.

- La temperatura del punto 1 corresponde con la de evaporación del refrigerante, y la presión 515 KPa, es la presión de saturación del refrigerante y a la temperatura de recalentamiento.
- El punto 2 se encuentra siguiendo una línea de entropía constante desde el punto 1 hasta la presión de saturación a la temperatura de condensación. Por lo tanto, la entropía del punto 1 y la del 2 son iguales, y como se mide la presión en la línea de alta se puede determinar la temperatura.
- La temperatura del punto 3 corresponde con la temperatura de condensación. La presión de este punto 1963 KPa, es la presión de saturación a la temperatura de sub enfriamiento del refrigerante. La entalpía y la entropía quedan definidas por la temperatura y la presión citadas anteriormente.
- Finalmente, para encontrar el punto 4 se sigue una línea de entalpía constante hasta la presión de saturación correspondiente a la temperatura de evaporación del fluido. Hay

que remarcar también que la temperatura de este punto no es la temperatura de evaporación, si no que queda definida con la entalpía y la presión.

- Como se tiene la capacidad de enfriamiento ( $Q_e$ ) del aire de acondicionado 12000 BTU, que corresponde 3,52 KW, se puede determinar el flujo másico del refrigerante y la capacidad de calor ( $Q_c$ ) que genera que es lo que interesa en este proyecto además del COP de enfriamiento y para calor.

Lo anterior se traslada a ecuaciones y se toman las propiedades del refrigerante elegido de la base de datos de EES, utilizando las funciones de este programa para obtenerlos.

*"Bomba de calor 12000 BTU"*

P [1]= 515[KPa]  
xv=1  
xl=0  
P [3] =2068[KPa]  
m=0,025 [Kg/s]

*"Estado 1"*

T [1] =Temperature (R22; P=P[1];x=xv)  
h [1] =Enthalpy (R22; P=P [1]; x=xv)  
s [1] =Entropy (R22; P=P [1]; x=xv)

*"Estado 3"*

T [3] =Temperature (R22; P=P [3]; x=xl)  
h [3] =Enthalpy (R22; P=P [3]; x=xl)  
s [3] =Entropy (R22; P=P [3]; x=xl)

*"Estado 2"*

P [2] =P [3]  
s [2] =s [1]  
h [2] =Enthalpy (R22; P=P [2]; s=s [2])  
T [2] =Temperature (R22; P=P [2]; s=s [2])

*"Estado 4"*

P [4]=P [1]  
h [4]=h [3]  
T [4] =Temperature (R22; P=P [4]; h=h [4])  
x [4] =Quality (R22; h=h [4]; T=T [4])

$Q_e=m*(h [1]-h [4])$   
 $W_{com}=m*(h [2]-h [1])$   
 $COP_e=Q_e/W_{com}$   
 $Q_c=m*(h [2]-h [3])$   
 $COP_c=Q_c/W_{com}$

Las funciones de EES utilizadas son:

- Pressure: Devuelve la presión de saturación del fluido a la temperatura y calidad dada.
- Temperature: devuelve la temperatura del fluido especificado dados dos parámetros independientes.
- Entropy: Proporciona la entropía del fluido especificando la temperatura, la presión o el título de vapor del fluido.
- Enthalpy: Función que devuelve la entalpía del fluido con dos parámetros independientes de entrada.

Las letras T, P, h, s, corresponden con la temperatura, la presión, la entalpía, la entropía de cada punto referido entre corchetes

Una vez con estos valores se puede definir el trabajo y el calor de cada parte del diagrama.

- En el ciclo de evaporación:

$$\text{Trabajo de compresión (W}_{\text{com}}) = h(2) - h(1)$$

$$\text{Calor absorbido por el sistema (Q}_{\text{e}}) = m \cdot h(1) - h(4)$$

- En el ciclo de condensación:

$$\text{Calor cedido por el sistema (Q}_{\text{c}}) = m \cdot h(2) - h(3)$$

- Rendimiento del ciclo COPe para refrigeración, de las siglas en inglés de “Coefficient of performance”.

$$\text{COPe} = W_{\text{f}} / W_{\text{com}}$$

- Rendimiento del ciclo COPc para calefacción.

$$\text{COPc} = W_{\text{f}} / W_{\text{com}}$$

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el programa:

**Tabla 11-3** Valores de las propiedades de la bomba de calor por cada punto

| Punto | h[i] KJ/Kg | P[i] KPa | T[i] °C | x[i] | s[i] KJ/Kg*K |
|-------|------------|----------|---------|------|--------------|
| 1     | 405,4      | 515      | 1,2     |      | 1,75         |
| 2     | 440,3      | 2068     | 75      |      | 1,75         |
| 3     | 267,3      | 2068     | 52,9    |      | 1,75         |
| 4     | 267,3      | 515      | 1,2     | 0,32 |              |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

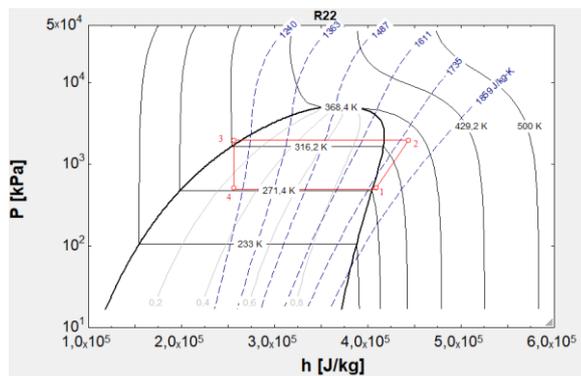
Con los puntos obtenidos en el programa se procede a determinar los valores de la potencia calorífica del aire acondicionado.

**Tabla 12-3** Potencia calorífica y mecánica de la bomba de calor

| Calor Absorbido<br>Q <sub>e</sub> (kW) | Calor cedido<br>Q <sub>c</sub> (kW) | COPe | COPc | Potencia del<br>compresor (kW) | Flujo refrigerante<br>(Kg/s) |
|--|-------------------------------------|------|------|--------------------------------|------------------------------|
| 3,51                                   | 4,4                                 | 3,95 | 4,95 | 0,888                          | 0,0254                       |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

El diagrama entálpico P-h creado por el programa EES para este caso concreto es el siguiente:



**Figura 33-3:** Diagrama P-h para para el refrigerante R-22

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Dónde se observa que el refrigerante trabaja por debajo de su temperatura crítica 368,4K (95,41°C) y está proporcionando una potencia calorífica de 4,41 KW, que es superior a la deseada.

### 3.4.2 Bomba de calor en un circuito abierto.

En el modelo de secado se estableció un valor de temperatura de 50 °C, y un caudal de 0,25 m<sup>3</sup>/s (900 m<sup>3</sup>/h), pero además se debe determinar con qué valor de humedad del aire está ingresando, para ello se realiza el análisis al condensador y al evaporador.

#### a.) Análisis del condensador operando en un ciclo abierto

Para el análisis del condensador primero se define el tipo de problema a desarrollar, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Fenómenos de transferencia de calor: conducción por los tubos, convección forzada por el exterior y también por el interior, en este último caso con cambio de fase (condensación).

- Problema: Conocidas las temperaturas de entrada, temperatura de salida del aire, la humedad relativa de entrada y el de cambio de fase del refrigerante en el intercambiador de dimensiones definidas, se calcula el coeficiente global de transmisión de calor y se estima la humedad relativa de salida la cual es la que ingresa a la cámara de secado.
- Método de la temperatura logarítmica media DTLM.
- Condiciones de trabajo: presión atmosférica.

Aspectos geométricos del condensador:

- Longitud de los tubos (L)= 520 mm
- Diámetro interior de los tubos (Dit)= 4 mm
- Diámetro exterior de los tubos (De)= 5 mm
- Número de filas de tubos en la dirección del flujo (Nl)= 2
- Número de columnas de tubos en altura (Nt)= 18
- Número de tubos totales (Ntotal)= es el resultado de multiplicar las filas por las columnas en este caso 36.

Una vez definido el aspecto geométrico de los tubos se anexa las dimensiones de las aletas, ya que el calor transferido, es bajo en la superficie de transferencia que proporcionaban solo los tubos.

- Paso entre aletas (Pal)= 1,5 mm
- Espesor de aleta (tf) = 0,2 mm
- Ancho de la aleta (An)=25 mm
- Alto de la aleta (Alet)=360 mm

Definición de los materiales empleados:

- Material de los tubos: Cobre
- Material de las aletas: Aluminio

Temperaturas ingreso y salida del aire

- Temperatura ingreso del aire (Tea)= 27°C
- Humedad relativa de ingreso HR= 69%
- Temperatura salida del aire (Tsa)= 50 °C
- Para la medición de la temperatura y humedad del aire se utilizó un sensor marca Maxwell TH900

Como se tiene el calor cedido por el sistema en el condensador ( $Q_c$ ), además la transferencia de calor en el exterior de los tubos  $Q_{extc}=m_{air} \cdot C_p \cdot (T_{sa}-T_{ea})$  y la transferencia de calor en el interior de los tubos  $Q_{intc}=U \cdot A_{ext} \cdot DTML$

La fórmula para la temperatura media logarítmica es:

$$DTML = \frac{(T_c - T_{sa}) - (T_c - T_{ea})}{\ln\left(\frac{T_c - T_{sa}}{T_c - T_{ea}}\right)} \quad (120)$$

Dónde:

$T_c$ = Temperatura del refrigerante en el interior de los tubos del condensador

$T_{sa}$ =Temperatura de la salida del aire en el condensador

$T_{ea}$ = Temperatura de la entrada del aire en el condensador

### b.) Cálculo del área de transferencia de calor del condensador

Con los datos de la temperatura, humedad y caudal de ingreso del aire al condensador, lo que se procede a determinar la humedad con la que sale el aire del condensador, para ello se utiliza el software EES, por poseer las propiedades del aire húmedo. Para esto se debe tener en cuenta que el calentamiento del aire a través del condensador es un calentamiento simple donde la humedad absoluta del aire permanece constante.

Se ingresa en el software EES las fórmulas para determinar la humedad relativa y el caudal con el que sale el aire del condensador, a continuación, se presenta el ingreso de las fórmulas en el mencionado programa.

```
Ca=0,25 [m^3/s]
T [1]=300[k]
rh [1]=0,69
P1=101,33 [KPa]
Q_c=4410[J/s]
v [1]=Volume (AirH2O; T=T [1]; r=rh [1]; P=P1)
m_dot=Ca/v[1]
h [1]=Enthalpy (AirH2O; T=T [1]; r=rh [1]; P=P1)
w [1]=HumRat (AirH2O; T=T [1]; r=rh [1]; P=P1)
w [2]=w [1]
Q_c=m_dot*(h [2]-h [1])
T [2]=Temperature (AirH2O; h=h [2]; w=w [2]; P=P1)
rh [2]=RelHum (AirH2O; T=T [2]; w=w [2]; P=P1)
```

Del programa se obtiene que con el caudal suministrado la temperatura a la salida del condensador es de 41,9 °C con una humedad relativa de 30%, con un flujo de masa de 0,29 Kg/s, estos valores no son los deseados para el secado del cacao, para ello se calcula con un caudal 0,17 m<sup>3</sup>/s, con este valor se obtiene una temperatura de 48,8 °C y una humedad 21%.

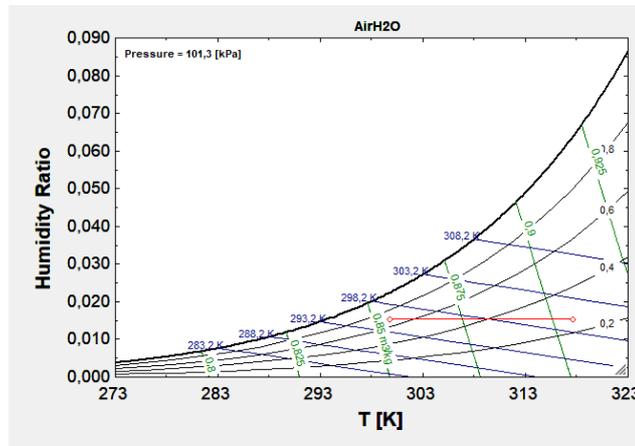
Se ingresa los valores establecidos previamente para calcular el coeficiente de transferencia global del condensador, los resultados se muestran en la tabla 14-3, en ella se determina que el coeficiente es de  $0,147 \text{ Kw/m}^2\cdot\text{K}$ , para obtener una temperatura de 45 grados de aire caliente.

**Tabla 13-3** Coeficiente de transferencia de calor en el condensador

| Q_c (KW) | Tea | Tsa | Tc | m air (Kg/s) | Caudal (m3/s) | DTML | UA    | Nf  | Aext (m2) | U (Kw/m <sup>2</sup> *K) |
|----------|-----|-----|----|--------------|---------------|------|-------|-----|-----------|--------------------------|
| 4,41     | 27  | 45  | 48 | 0,195        | 0,17          | 10,6 | 0,415 | 208 | 3,24      | 0,128                    |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

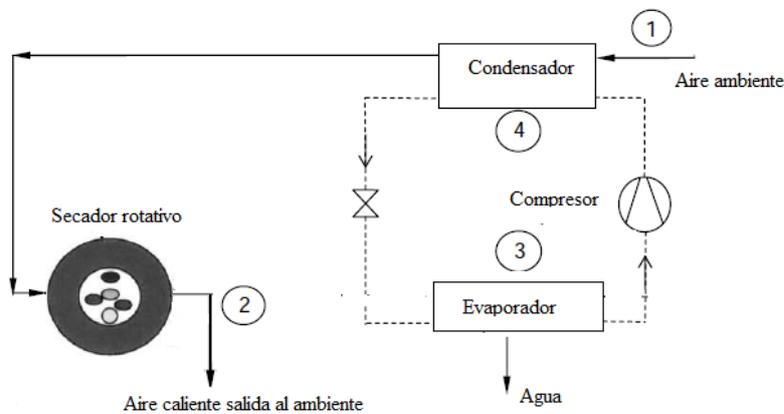
En la figura 47-3 se observa la ubicación de las humedades del aire que le corresponden a la entrada y salida del condensador en la tabla psicométrica.



**Figura 34-3:** Psicometría del aire de salida del condensador.

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Del análisis del condensador se resume que, a la salida de la bomba de calor para obtener una temperatura de  $48,8^\circ\text{C}$  y una humedad del 21% se debe tener un caudal de  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $612 \text{ m}^3/\text{h}$ ), Esto ocurre si la bomba de calor funcionara en un ciclo abierto como lo indica la figura 35-3



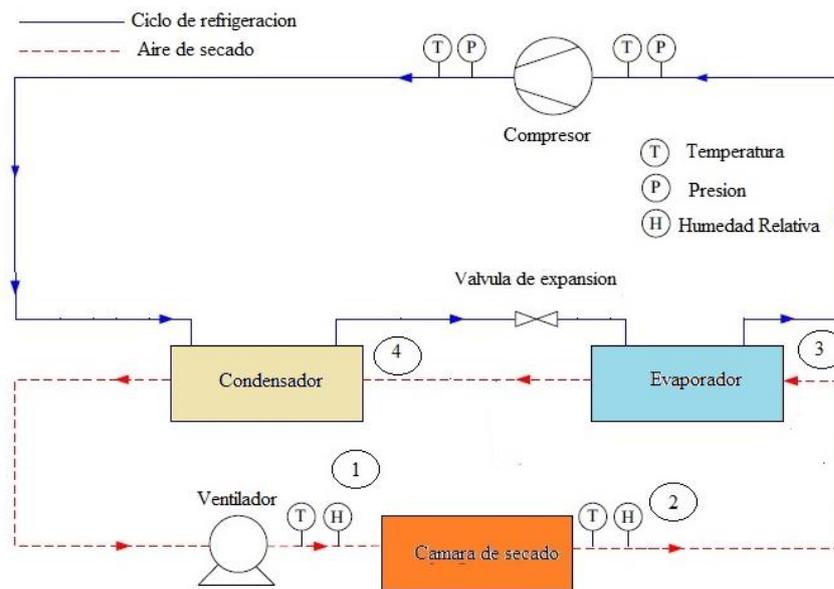
**Figura 35-3:** Esquema secado por bomba de calor sin recirculación de aire.

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

De la figura 35-3 la bomba de calor el punto 1 es el ingreso del aire ambiente que es la temperatura promedio de 27°C, el punto 2 representa la salida del aire de secado del tambor rotativo, los puntos 3 y 4 representan el evaporador y condensador respectivamente. Con este sistema la bomba de calor debe estar accionada todo el tiempo de secado y además esta dependerá de la temperatura y humedad del ambiente.

### 3.4.3 Diseño del sistema de recirculación de aire caliente para la bomba de calor.

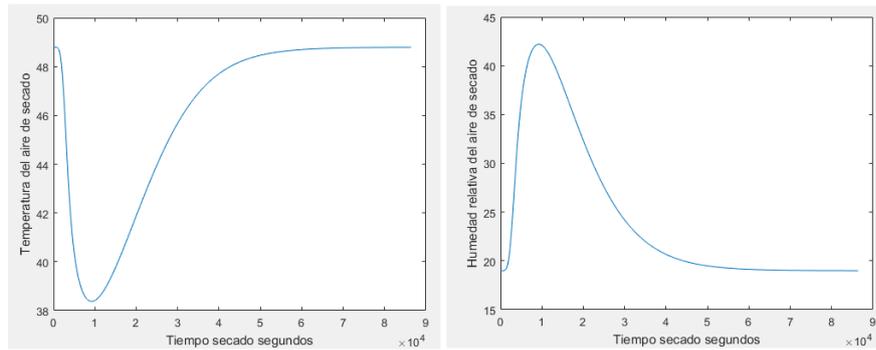
Para el sistema de recirculación se plantea el siguiente esquema:



**Figura 36-3:** Esquema secado por bomba de calor con recirculación de aire.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

En este esquema se plantea que el aire que sale del tambor rotativo (2) ingresará al evaporador para que se enfríe (3) y este a su vez ingresará al condensador (4) para que lo caliente y sea ingresado al tambor rotativo.

Se ingresa en el modelo de secado un caudal de 612 m<sup>3</sup>/h (0,17 m<sup>3</sup>/s), la temperatura del aire de secado 48,8°C con una humedad relativa del 19 %, y la masa a obtener de 19,5 Kg, en donde se obtiene la variación de la humedad y temperatura del aire en función del tiempo, con estos datos se debe analizar cuanto de humedad del aire y temperatura reduce en el evaporador y luego ese valor ingresará al condensador para que caliente el aire y reduzca la humedad relativa del aire, en el punto 1.



**Gráfico 14-3:** Variación de la temperatura y humedad del aire de secado.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

En el gráfico 14-3 se observa que el aire de secado, gana humedad conforme se va secando las pepas de cacao, según el modelo con un caudal de  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ , alcanzaría su máxima humedad de la muestra a secar del 42,21 % en un tiempo de 9453 segundos (2,63 horas) y al mismo tiempo la temperatura se reduce hasta  $38,38 \text{ }^\circ\text{C}$ . El tiempo total de secado de cacao, cuando ya no existe variación de la humedad del aire, para este caso ocurre a los 86360 segundos (23,9 horas).

**Tabla 14-3** Relación entre la humedad, temperatura y tiempo en la cámara de secado

| Tiempo | Temperatura | Humedad |
|--------|-------------|---------|
| 0      | 48,8        | 19      |
| 3600   | 43,21       | 29,23   |
| 7200   | 38,7        | 41,26   |
| 9453   | 38,38       | 42,21   |
| 10800  | 38,53       | 41,74   |
| 14400  | 39,56       | 38,59   |
| 18000  | 41,02       | 34,5    |
| 21600  | 42,58       | 30,67   |
| 25200  | 44,05       | 27,41   |
| 28800  | 45,32       | 24,87   |
| 32400  | 46,34       | 22,99   |
| 36000  | 47,11       | 21,66   |
| 39600  | 47,66       | 20,75   |
| 43200  | 48,05       | 20,14   |
| 46800  | 48,31       | 19,73   |
| 72000  | 48,77       | 19,03   |

**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

Los valores obtenidos en la tabla 14-3 del modelo matemático de secado de cacao se basan suponiendo una temperatura constante del aire de secado de 48,8°C y una humedad relativa del 19 % a la entrada del secador rotativo.

#### 3.4.3.1 *Análisis de la recirculación evaporador-condensador*

Primero se analiza el comportamiento de la humedad del aire de secado mientras circula por el evaporador.

##### **a) Análisis del evaporador:**

Aspectos geométricos del evaporador:

- Longitud de los tubos (L)= 360 mm
- Diámetro interior de los tubos (Dit)= 6 mm
- Diámetro exterior de los tubos (De)= 7 mm
- Número de filas de tubos en la dirección del flujo (Nl)= 2
- Número de columnas de tubos en altura (Nt)= 16
- Número de tubos totales (Ntotal)= es el resultado de multiplicar las filas por las columnas en este caso 32.

Una vez definido el aspecto geométrico de los tubos se anexa las dimensiones de las aletas, ya que el calor transferido, es bajo en la superficie de transferencia que proporcionaban solo los tubos.

- Paso entre aletas (Pal)= 2 mm
- Espesor de aleta (tf) = 0,5 mm
- Ancho de la aleta (An)=22 mm
- Alto de la aleta (Alet)=340 mm

Definición de los materiales empleados:

- Material de los tubos: Cobre
- Material de las aletas: Aluminio

Caudal y Temperaturas ingreso del aire

- Caudal de ingreso del aire=0,17 m<sup>3</sup>/s
- Temperatura ingreso del aire (Tea) y Humedad relativa de ingreso HR= Se obtiene del modelo de secado.

Como se tiene el calor cedido por el sistema en el evaporador ( $Q_e$ ), además la transferencia de calor en el exterior de los tubos  $Q_{ext} = m_{air} \cdot C_p \cdot (T_{sa} - T_{ea})$  y la transferencia de calor en el interior de los tubos  $Q_{int} = U \cdot A_{ext} \cdot DTML$ .

**b.) Cálculo del área de transferencia de calor del evaporador.**

Se utiliza el software EES donde se ingresan las fórmulas que gobiernan en un evaporador, como lo es el calor sensible y el calor latente, para determinar la temperatura a la salida del condensador

```
P1=101,33 [kpa]
Qe=3520 [J/s]
Cae=0,17 [m^3/s]
T[3]=301[k]
rh [3] =0,65
v [3] =Volume (AirH2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P1)
m_dote=Cae/v [3]
h [3] =Enthalpy (AirH2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P1)
w [3] =HumRat (AirH2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P1)
rh [4] =1
w [4] =w [3]
h [4] =Enthalpy (AirH2O; w=w [3]; r=rh [4]; P=P1)
T [4] =Temperature (AirH2O; w=w [4]; r=rh [4]; P=P1)
Qse=m_dote*(h [3]-h [4])
Qe=Qse+Qle
Qle=m_dote*(h [4]-h [5])
rh [5] =1
T [5] =Temperature (AirH2O; h=h [5]; r=rh [5]; P=P1)
```

Se va a tomar la mínima temperatura del aire según el modelo la cual es de 38,53 °C y una humedad de 42,2 %.

Se ingresa los valores geométricos del evaporador para calcular su coeficiente de transferencia global, los resultados se muestran en la tabla 15-3, en ella se calcula que el coeficiente es de 0,067 KW/m<sup>2</sup>\*K, para obtener una temperatura de 22,6 grados de aire a la salida del evaporador con una temperatura ambiente de 38,53 °C.

**Tabla 15-3** Coeficiente de transferencia de calor en el evaporador

| Q <sub>e</sub> (KW) | Tea   | Tsa  | Tc  | m air (Kg/s) | Caudal (m3/s) | DTML  | UA    | Nf  | Aext (m2) | U (Kw/m <sup>2</sup> *K) |
|---------------------|-------|------|-----|--------------|---------------|-------|-------|-----|-----------|--------------------------|
| 3,44                | 38,53 | 22,6 | 3,6 | 0,138        | 0,19          | 26,16 | 0,135 | 144 | 2         | 0,067                    |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

**c.) Cálculo de las temperaturas y humedad en los puntos del sistema de recirculación.**

Para determinar la temperatura del aire de secado después del evaporador se aplica las formulas del enfriamiento con deshumidificación donde se determina su calor sensible y su calor latente.

Para determinar su calor sensible se aplica la siguiente formula

$$Q_s = \dot{m}_a * (h_3 - h_x) \quad (121)$$

Dónde  $Q_s$  representa al Calor sensible,  $\dot{m}_a$  es el flujo de aire que circula por el evaporador,  $h_3$  es la entalpia de entrada al evaporador,  $h_x$  representa la entalpia cuando la humedad relativa llega al 100%, la humedad específica en este punto es igual a la humedad de ingreso al evaporador.

Si el aire llega al punto de rocío (aire saturado), el enfriamiento adicional representa el calor latente cuya fórmula es la siguiente:

$$Q_l = \dot{m}_a * (h_x - h_4) \quad (122)$$

Dónde  $Q_l$  representa al Calor latente,  $\dot{m}_a$  es el flujo de aire que circula por el evaporador,  $h_4$  es la entalpia de salida del evaporador,  $h_x$  representa la entalpia cuando la humedad relativa llega al 100%.

Como el calor que cede el evaporador (enfriamiento) es la suma del calor latente y el calor sensible y este valor es de 3,44 KW y con este valor más las ecuaciones del calor sensible y latente se puede determinar la entalpia en el punto 4, a la vez se puede determinar la humedad específica y la temperatura a la salida del evaporador.

$$Q_e = Q_s + Q_l \quad (123)$$

Una vez determinada la temperatura en el punto 4 y su humedad específica se procede a aplicar las formulas del calentamiento simple en el condensador cuya fórmula es

$$Q_c = \dot{m}_a * (h_1 - h_4) \quad (124)$$

Dónde  $Q_c$  representa al calor generado en el condensador y se obtuvo de 4,41 KW, con este valor conocido se calcula la entalpia en el punto 1 y a su vez su humedad relativa y temperatura.

Las ecuaciones descritas fueron desarrolladas en el software EES, se procede a determinar las temperaturas y humedades de los diferentes puntos de la recirculación del aire, se presenta las fórmulas ingresadas en el programa y en la tabla 16-3 los resultados obtenidos.

$P_1=101,33$  [kpa]  
 $Q_e=3448$  [J/s]  
 $Cae_2=0,30$  [m<sup>3</sup>/s]  
 $T [3] =312,56$ [k]  
 $rh [3] =0,385$   
 $v [3] =Volume (AirH_2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P_1)$   
 $\dot{m}_{dote1}=Cae_2/v [3]$   
 $h [3] =Enthalpy (AirH_2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P_1)$   
 $w [3] =HumRat (AirH_2O; T=T [3]; r=rh [3]; P=P_1)$   
 $Q_e=\dot{m}_{dote1}*(h [3]-h [4])$   
 $w [3]=w [4]$

$T[4] = \text{Temperature}(\text{AirH2O}; h=h[4]; w=w[3]; P=P1)$   
 $rh[4] = \text{RelHum}(\text{AirH2O}; T=T[4]; w=w[4]; P=P1)$   
 $v[4] = \text{Volume}(\text{AirH2O}; T=T[4]; r=rh[4]; P=P1)$

$Q_c=4410 \text{ [J/s]}$   
 $Q_c=m_{\text{dote1}}*(h [1]-h [4])$   
 $w [1] =w [4]$   
 $T [1] =\text{Temperature} (\text{AirH2O}; h=h [1]; w=w [1]; P=P1)$   
 $rh [1] =\text{RelHum} (\text{AirH2O}; T=T [1]; w=w [1]; P=P1)$   
 $v [1] =\text{Volume} (\text{AirH2O}; T=T [1]; r=rh [1]; P=P1)$   
 $Ca1=m_{\text{dote1}}*v [1]$

**Tabla 16-3** Temperatura –Humedad en los diferentes puntos de recirculación de la bomba.

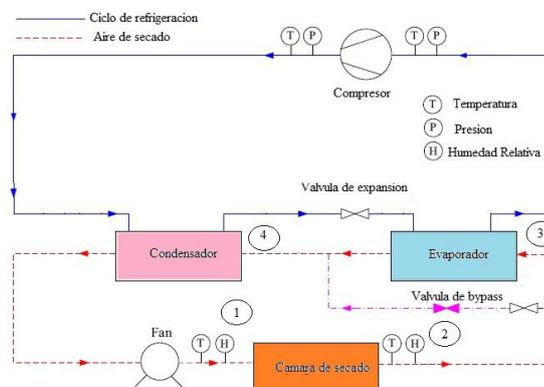
| Tiempo | T2 (°C) | Hr 2 (%) | T4 (°C) | Hr 4 (%) | T1 (°C) | Hr 1 (%) |
|--------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 3600   | 43,21   | 29,23    | 27,9    | 68       | 47,5    | 23,5     |
| 9453   | 38,38   | 42,2     | 23,3    | 99       | 42,6    | 34       |
| 14400  | 39,56   | 38,59    | 24,4    | 91       | 43,8    | 31       |
| 18000  | 41,02   | 34,5     | 25,8    | 81       | 45,3    | 28       |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Al plantear este sistema de recirculación de aire (evaporador-condensador), con un caudal de  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ , se presenta el inconveniente de que la temperatura de ingreso T1 y su humedad Hr1, no serán constantes y conforme la temperatura de salida de la cámara de secado disminuya, también lo hará la temperatura de ingreso a la cámara de secado, esto no está previsto en el modelo matemático por ende se utilizará a otra alternativa, como la plantea por (Minea, 2013), el cual es de realizar un bypass.

### 3.4.3.2 Diseño del bypass para la recirculación del aire.

Para diseñar el bypass se plantea el esquema de la siguiente figura, donde es necesario establecer la temperatura del punto 4, aplicando las ecuaciones 19 y 20 de la mezcla adiabática, este estudio también realizado por (Shengchun , Xueqiang, Mengjie, Hailong , & Zhili , 2018)



**Figura 37-3:** Esquema de recirculación de aire con bypass

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Estas fórmulas se anexan en el software EES junto con las fórmulas para el análisis del evaporador – condensador, a continuación, se presentan las formulas ingresadas en el programa:

```

Ca=0,17[m^3/s]
P1=101,33 [kpa]
T [2] =314,46[k]
rh [2] =0,376
Q_e=3448 [J/s]
Q_c=4410[J/s]

v [2] =Volume (AirH2O; T=T [2]; r=rh [2]; P=P1)
m_dot=Ca/v [2]
w [2] =HumRat (AirH2O; T=T [2]; r=rh [2]; P=P1)

m2a=m_dot*0,82 %%flujo de masa por el bypass
m2b=m_dot-m2a  %%flujo de masa por el evaporador
Ca2b=m2b*v[2]

h2a=Enthalpy (AirH2O; T=T [2]; w=w [2]; P=P1) %% Entalpía por el bypass
h2b=Enthalpy (AirH2O; T=T [2]; w=w [2]; P=P1) %% Entalpía por el evaporador

Q_e=Qs+Ql
w [4]=w [2]
rh [4]=1
h [4] =Enthalpy (AirH2O; w=w [4]; r=rh [4]; P=P1)
T [4] =Temperature (AirH2O; w=w [4]; r=rh [4]; P=P1)
Qs=m2b*(h2b-h [4])
Ql=m2b*(h[4]-h4b)
rhb=1
wb=HumRat (AirH2O; h=h4b; r=rhb; P=P1)
T4b=Temperature (AirH2O; w=wb; h=h4b; P=P1)

hm=((m2a*h2a) +(m2b*h4b))/m_dot
rhm= ((m2a*rh [2]) +(m2b*rhb)) /m_dot %% humedad relativa de la mezcla adiabática
Tm=Temperature (AirH2O; h=hm; r=rhm; P=P1) %%Temperatura de la mezcla adiabática

Q_c=m_dot*(h11-hm)
w1=HumRat (AirH2O; T=Tm;r=rhm;P=P1)
T1=Temperature(AirH2O;h=h11;w=w1;P=P1)
rh1=RelHum(AirH2O;T=T1;w=w1;P=P1)

```

Al ingresar el dato de caudal de 0,17 m<sup>3</sup>/s, se tiene en el punto 1 una temperatura de 50,5 °C, y al comparar con los puntos de trabajo del ciclo de la bomba de calor tabla 12-3, donde la temperatura en el condensador es de 52,9 °C, se tiene una diferencia de temperatura de 2,4°C, para garantizar la transferencia de calor, se recalcula el ciclo para determinar las presiones con la que va a trabajar la bomba de calor y se obtiene con una presión de 2137 KPa (310 PSI) y una temperatura de 54,3 °C, que es la temperatura que ingresaría a la cámara de secado, a esta temperatura se le restará 4 °C por la pérdida de temperatura que podría ocurrir al atravesar el ventilador y los ductos.

A continuación, se presentan los resultados de los cálculos obtenidos

**Tabla 17-3** Valores de Temperatura –Humedad y porcentaje de flujo.

| Tiempo | T2 (°C) | Hr 2 (%) | T4m (°C) | Hrm 4 (%) | Porcentaje flujo bypass | T1 (°C) | Hr 1 (%) |
|--------|---------|----------|----------|-----------|-------------------------|---------|----------|
| 0      | 50      | 19       | 28       | 69        | 38%                     | 51,6    | 21       |
| 3600   | 43,78   | 31,69    | 27       | 76        | 33 %                    | 50      | 22       |
| 7200   | 39,4    | 43,71    | 27       | 76        | 42 %                    | 50      | 22       |
| 8996   | 39,18   | 44,43    | 27       | 76        | 43 %                    | 50      | 22       |
| 10800  | 39,42   | 43,65    | 27       | 76        | 42 %                    | 50      | 22       |
| 14400  | 40,62   | 39,95    | 27       | 76        | 39 %                    | 50      | 22       |
| 18000  | 42,22   | 35,54    | 27       | 76        | 37 %                    | 50      | 22       |
| 21600  | 43,9    | 31,41    | 27       | 76        | 33 %                    | 50      | 22       |
| 25200  | 45,44   | 28,04    | 27       | 76        | 31 %                    | 50      | 22       |
| 28800  | 46,73   | 25,48    | 27       | 76        | 29 %                    | 50      | 22       |
| 32400  | 47,75   | 23,63    | 27,1     | 75        | 30 %                    | 50,2    | 21       |
| 36000  | 48,05   | 22,36    | 27,1     | 74        | 33 %                    | 50,3    | 21       |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

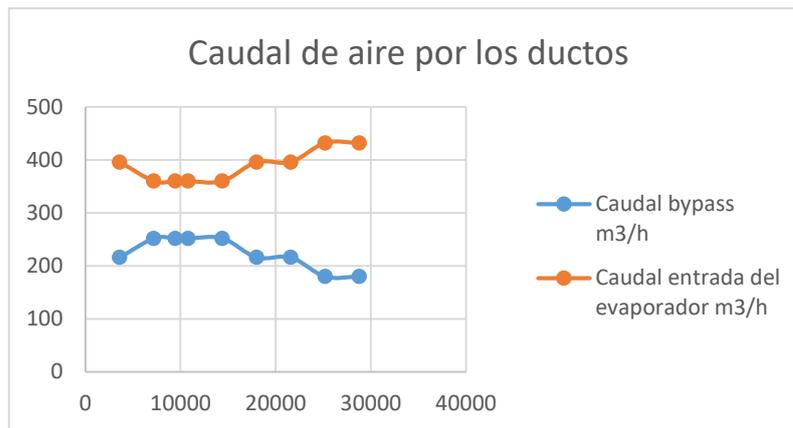
En la tabla se observa el porcentaje de flujo que debe circular por el bypass para que se permanezca constante la temperatura en el punto (1) en la entrada a la cámara de secado y este valor oscila entre el 33 al 43 %, esto ocurre con un caudal total de 0,17 m<sup>3</sup>/s, y se puede calcular el caudal que circula por el evaporador y por el bypass, esto se presenta en la siguiente tabla. Pero se visualiza que el bypass funciona con el caudal en un rango de 3600 a 28800 segundos, porque después de ese tiempo la temperatura del aire alcanza la temperatura de ingreso, y no se podría mantener la temperatura estable la entrada de la cámara de secado, es por eso que se puede utilizar la estrategia de reducir la temperatura de ingreso a la cámara de secado o la bomba puede trabajar en forma intermitente según (Chua, 2000).

Con los valores de la presente tabla se procede a obtener las gráficas del comportamiento del caudal que circula por el evaporador y por el bypass en función del tiempo.

**Tabla 18-3** Variación del caudal en el evaporador y por el bypass en función del tiempo

| Tiempo | Porcentaje flujo bypass | Caudal bypass m <sup>3</sup> /s (m <sup>3</sup> /h) | Caudal entrada del evaporador m <sup>3</sup> /s (m <sup>3</sup> /h) |
|--------|-------------------------|---|---|
| 3600   | 33 %                    | 0,06 (216)  | 0,11 (396)  |
| 7200   | 42 %                    | 0,07 (252)  | 0,1 (360)   |
| 9453   | 43 %                    | 0,07 (252)  | 0,1 (360)   |
| 10800  | 42 %                    | 0,07 (252)  | 0,1 (360)   |
| 14400  | 39 %                    | 0,07 (252)  | 0,1 (360)   |
| 18000  | 37 %                    | 0,06 (216)  | 0,11 (396)  |
| 21600  | 33 %                    | 0,06 (216)  | 0,11 (396)  |
| 25200  | 31 %                    | 0,05 (180)  | 0,12 (432)  |
| 28800  | 29 %                    | 0,05 (180)  | 0,12 (432)  |

Realizado por: Carlos Zhigui,2020



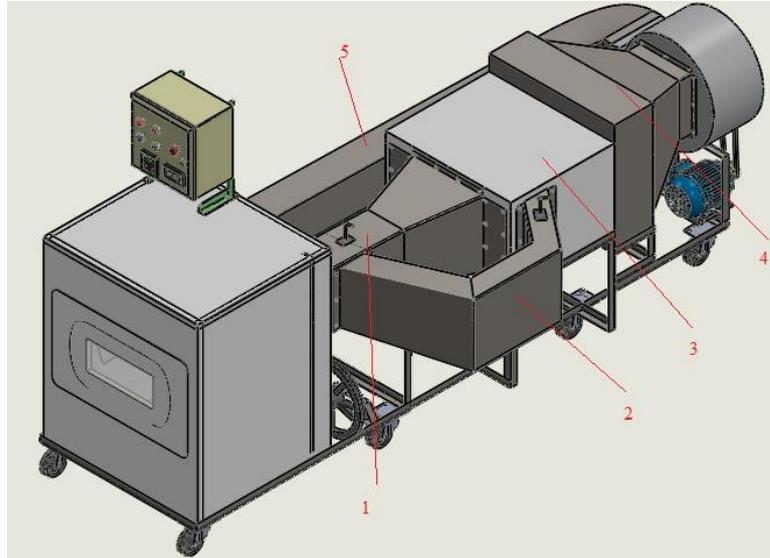
**Gráfico 15-3:** Esquema de recirculación de aire con bypass.

Realizado por: Carlos Zhigui,2020

Los cálculos realizados hasta el momento han permitido determinar el caudal mínimo necesario para la transferencia de calor en el evaporador y condensador el cual es de 0,17m<sup>3</sup>/s (612 m<sup>3</sup>/h), distribuidos en un caudal máximo de 252 m<sup>3</sup>/h por el bypass y 432 m<sup>3</sup>/h por el evaporador, esto permitirá calcular las dimensiones de los ductos y a la vez seleccionar el ventilador adecuado para realizar la recirculación del aire.

### 3.5 Diseño de los ductos de recirculación del aire de secado para la bomba de calor.

El Caudal calculado en la sección anterior para el sistema es de  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ , por ello es necesario estimar la pérdida de carga total para seleccionar el ventilador adecuado, para esto se ha separado el sistema por tramos los cuales se indican en la siguiente figura.



**Figura 38-3:** Tramos de los conductos de la máquina.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

A continuación, se describen los componentes de cada tramo:

- Tramo 1: Es la sección por donde el aire de secado sale de la cámara, es el punto 2 de la figura 51-3, está compuesto de un ducto rectangular, un difusor, una derivación para el bypass y una mariposa para controlar el paso de caudal a través del ducto.
- Tramo 2: Está compuesto por la derivación del bypass de entrada y salida, la mariposa para controlar el flujo.
- Tramo 3: Donde están el evaporador y condensador de la bomba de calor.
- Tramo 4: Salida del condensador y un difusor.
- Tramo 5: Es la impulsión del aire de secado a través del ventilador, y está compuesto por un codo y la tubería de ingreso a la cámara de secado y la caída de presión en la cámara de secado.

#### 3.5.1 Selección de las dimensiones del conducto a la salida de la cámara de secado.

Según (SODECA), la velocidad recomendada para un ducto principal en una instalación industrial es de  $4,5$  a  $8 \text{ m/s}$ , se escogerá la velocidad mínima de  $4,5 \text{ m/s}$ , como se tiene el caudal calculado

de 0,17 m<sup>3</sup>/s, se puede determinar el área, la cual es de 0,04 m<sup>2</sup>, con esto se puede obtener las dimensiones de la sección cuadrada, aplicando su diámetro hidráulico a una sección rectangular, se obtiene las dimensiones de 179\*240 mm.

### 3.5.2 Cálculo de las pérdidas de carga en los ductos

#### a.) Cálculo de pérdidas de carga por rozamiento.

Para el cálculo de las pérdidas de carga por rozamiento se aplica la ecuación 83 para cada tramo, los resultados se presentan en la siguiente tabla para el tramo de retorno:

**Tabla 19-3** Pérdida de carga por rozamiento en los tramos de retorno

| Tramos de retorno |       |        |        |        |                        |         |                       |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|------------------------|---------|-----------------------|
| Tramos            | L     | a (mm) | b (mm) | Dh (m) | Ca (m <sup>3</sup> /s) | V (m/s) | Caída de Presión (Pa) |
| Tramo 1           | 0,782 | 179    | 240    | 0,23   | 0,17                   | 4,24    | 0,844                 |
| Tramo 2           | 1,216 | 120    | 250    | 0,19   | 0,07                   | 2,57    | 0,668                 |
| Tramo 3           | 0,5   | 600    | 390    | 0,53   | 0,17                   | 0,78    | 0,009                 |
| Tramo 4           | 0,546 | 246    | 246    | 0,27   | 0,17                   | 2,99    | 0,253                 |
| Total             |       |        |        |        |                        |         | 1,77                  |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

De igual manera se calcula para el tramo de impulsión:

**Tabla 20-3** Pérdida de carga por rozamiento en los tramos de retorno

| Impulsión |       |        |        |        |                        |         |                       |
|-----------|-------|--------|--------|--------|------------------------|---------|-----------------------|
| Tramos    | L     | a (mm) | b (mm) | Dh (m) | Ca (m <sup>3</sup> /s) | V (m/s) | Caída de Presión (Pa) |
| Tramo 5   | 1,667 | 170    | 210    | 0,21   | 0,17                   | 4,79    | 2,51                  |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

#### b.) Cálculo de las pérdidas de carga en accesorios

En el tramo 5 en lo referente a la diferencia de cotas se utiliza la ecuación 84 y para la caída de presión en la cámara de secado se utiliza la ecuación 88. Los valores de C se calcularon de acuerdo al Anexo D, en base a (Isover Saint-Gobain, 2009) y (Estudios Energéticos Para Mantenimiento, S.L., 2020).

**Tabla 21-3** Pérdida de carga en accesorios

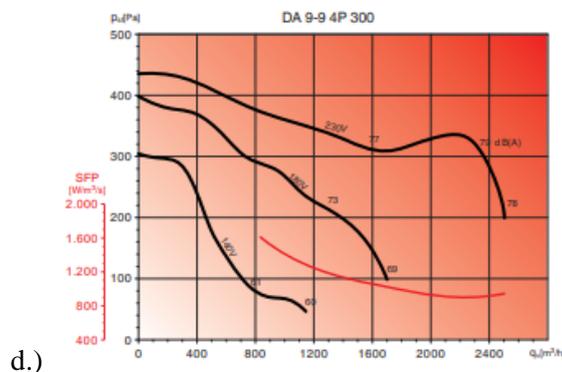
| Tramo 1                        |      |         |                        |              |
|--------------------------------|------|---------|------------------------|--------------|
| Nombre del accesorio           | C    | V (m/s) | ρ (kg/m <sup>3</sup> ) | Presión (Pa) |
| Derivación                     | 0    | 4,24    | 1,12                   | 0,00         |
| Compuerta                      | 1    | 4,24    | 1,12                   | 10,06        |
| Difusor                        | 0,33 | 4,24    | 1,12                   | 3,32         |
| Rejilla entrada                | 0,5  | 4,24    | 1,12                   | 5,03         |
| Total caída de presión tramo 1 |      |         |                        | 13,38        |

| Tramo 2                        |       |      |      |        |
|--------------------------------|-------|------|------|--------|
| Derivación entrada             | 0,33  | 2,57 | 1,12 | 1,22   |
| Derivación salida              | 0,44  | 2,57 | 1,12 | 1,63   |
| Bypass                         | 0,23  | 2,57 | 1,12 | 0,85   |
| Compuerta                      | 1     | 2,57 | 1,12 | 3,70   |
| Total caída de presión tramo 2 |       |      |      | 7,39   |
| Tramo 3                        |       |      |      |        |
| evaporador                     | 3     | 0,78 | 1,12 | 1,03   |
| condensador                    | 3     | 0,78 | 1,12 | 1,03   |
| Total caída de presión tramo 3 |       |      |      | 2,06   |
| Tramo 4                        |       |      |      |        |
| Difusor                        | 0,07  | 2,99 | 1,12 | 0,35   |
| Tramo 5                        |       |      |      |        |
| Codo                           | 0,19  | 4,79 | 1,12 | 2,44   |
| Diferencia cotas               | 0,174 |      |      | 2,05   |
| Salida                         | 1     | 4,79 | 1,12 | 12,84  |
| Cámara de secado               |       |      |      | 342    |
| Total caída de presión tramo 5 |       |      |      | 359,33 |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

### c.) Selección del ventilador

Para el cálculo de la presión del ventilador a seleccionar se utiliza la ecuación 89, con un caudal de  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $612 \text{ m}^3/\text{h}$ ), lo que se obtiene una presión a vencer de  $382,82 \text{ Pascales.}$ , con este dato se procede a buscar un ventilador comercial que cumpla con estas características y se consigue un Ventilador Centrífugo tipo DA 9-9 4P 300, sus especificaciones técnicas están disponibles en el Anexo E, la curva de presión y caudal se presenta en la figura 39-3, en la que indica que con el caudal deseado el ventilador puede vencer una presión de  $400 \text{ Pascales}$  que es superior a la calculada, cabe recalcar que se usa este ventilador porque es el único disponible en el medio local, si se deseaba otro de mayor presión, había que hacer un pedido que demoraría más tiempo.



**Figura 39-3:** Curva de presión y caudal el ventilador seleccionado.  
Fuente: (Cairox Airvance)

Al término del diseño se concluye que para la secadora de cacao se utilizará una bomba de calor de 12000 BTU, con una fuente de voltaje de 220 Voltios, que consta con un tambor rotativo que gira a 8 rpm y es accionado por un motor de ¼ de HP de 220 Voltios, para obtener una masa máxima de 19,5 Kg de cacao seco, el ventilador a usar será un tipo DA 9-9 4P-300 que proporcionará un caudal de 612 m<sup>3</sup>/h y podrá vencer una presión de 400 Pascales utilizando una fuente de voltaje de 220 Voltios.

#### d.) Selección de material de los ductos.

Los ductos son construidos según recomendación de (Isover Saint-Gobain, 2009), donde indica que se puede utilizar chapa metálica de acero galvanizado, puesto que estos son conductores térmicos deben aislarse térmicamente, habitualmente el material utilizado son mantas de lana vidrio con recubrimiento de aluminio para colocar en el lado exterior del conducto.

#### 3.5.3 Cálculo del espesor del aislamiento térmico

Para el cálculo del espesor del aislante térmico se utilizan las fórmulas desde la 90 hasta 98, para los distintos tramos de los conductos figura 38-3, para obtener estos resultados se considera un estado estacionario, una temperatura ambiente 25 °C y el material aislante lana de vidrio con un espesor de 38 mm y una conductividad térmica de 0,042 (W/m K), según especificaciones del fabricante.

**Tabla 22-3** Pérdida de calor en los ductos con y sin aislante de espesor 38 mm

| Tramos  | Longitud Ducto (metros) | Temperatura Entrada al ducto (°C) | Perdida de calor sin aislante térmico (W) | Perdida de calor con aislante térmico (W) | Temperatura a salida del ducto sin aislante térmico | Temperatura a salida del ducto con aislante térmico |
|---------|-------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|
| Tramo 1 | 0,782                   | 48                                | 106                                       | 19  | 47,57   | 47,92   |
| Tramo 2 | 1,216                   | 48                                | 85  | 16,68                                     | 47,37   | 47,87   |
| Tramo 3 | 0,5                     | 27                                | 10,4                                      | 3,16                                      | 26,96   | 26,99   |
| Tramo 4 | 0,546                   | 50                                | 152,7                                     | 24,58                                     | 49,38   | 49,90   |
| Tramo 5 | 1,67                    | 50                                | 105                                       | 18,93                                     | 49,41   | 49,89   |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

De la tabla se obtiene que la temperatura a lo largo del ducto sufre una diferencia de 0,48 grados centígrados cuando no se utiliza el material aislante y en la pérdida de calor se obtiene una reducción promedio del 80% al utilizar el material aislante de lana de vidrio. De la tabla también se obtiene que en el tramo 3 es decir donde se origina la mezcla adiabática no sería necesario utilizar el material aislante debido a que de todos los tramos es el que menos pierde calor, esto es debido porque en ese tramo la temperatura en el interior del ducto es por dos grados de diferencia con la temperatura ambiente.

Se analiza también la influencia del material aislante en el proceso de secado y para ello se va a utilizar el modelo numérico realizado para determinar la influencia en la temperatura al ingreso de la cámara de secado (tramo 5), los resultados obtenidos fueron que el tiempo de secado para un caudal de 0,17 m<sup>3</sup>/s, una temperatura de ingreso de 49,89 grados centígrados y una masa de cacao seco a obtener de 19,5 Kg es de 19,74 horas y sin el aislante se obtiene un tiempo de 20,11 horas, es decir existe una reducción de 22 minutos en el tiempo de secado, esto es con un aislante térmico de lana de vidrio de espesor de 38 mm.

También se realizó el cálculo con un espesor de 50 mm del material con esto se obtiene una reducción promedio del 83 % y una diferencia de temperaturas de 0,5 grados

**Tabla 23-3** Pérdida de calor en los ductos con y sin aislante de espesor 50 mm

| Tramos  | Longitud Ducto (metros) | Temperatura Entrada al ducto (°C) | Perdida de calor sin aislante térmico (W) | Perdida de calor con aislante térmico (W) | Temperatura a salida del ducto sin aislante térmico | Temperatura a salida del ducto con aislante térmico |
|---------|-------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|
| Tramo 1 | 0,782                   | 48                                | 106                                       | 15,47                                     | 47,57   | 47,94   |
| Tramo 2 | 1,216                   | 48                                | 85  | 13,6                                      | 47,37   | 47,9  |
| Tramo 3 | 0,5                     | 27                                | 10,4                                      | 2,62                                      | 26,96   | 26,99   |
| Tramo 4 | 0,546                   | 50                                | 152,7                                     | 19,81                                     | 49,38   | 49,92   |
| Tramo 5 | 1,67                    | 50                                | 105                                       | 15,41                                     | 49,41   | 49,91   |

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020

Se analiza también la influencia del material aislante en el proceso de secado y para ello se va a utilizar el modelo numérico realizado para determinar la influencia en la temperatura al ingreso de la cámara de secado (tramo 5), los resultados obtenidos fueron que el tiempo de secado para un caudal de 0,17 m<sup>3</sup>/s, una temperatura de ingreso de 49,89 grados centígrados y una masa de cacao seco a obtener de 19,5 Kg es de 19,75 horas y sin el aislante se obtiene un tiempo de 20,11 horas, es decir existe una reducción de 21 minutos en el tiempo de secado, esto es con un aislante térmico de lana de vidrio de espesor de 50 mm.

Al comparar los espesores de 38 mm y 50 mm se obtiene una diferencia de 1 minuto del proceso de secado, por ende, se escoge la aislante lana de vidrio de 38 mm de espesor, obteniéndose na reducción de 21 minutos en el proceso de secado.

## CAPÍTULO IV

### 4. PRUEBAS Y RESULTADOS.

#### 4.1 Descripción de la maquina secadora de cacao por bomba de calor.

La máquina construida se indica en la siguiente figura



**Figura 1-4:** Fotos de la máquina secadora de cacao  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

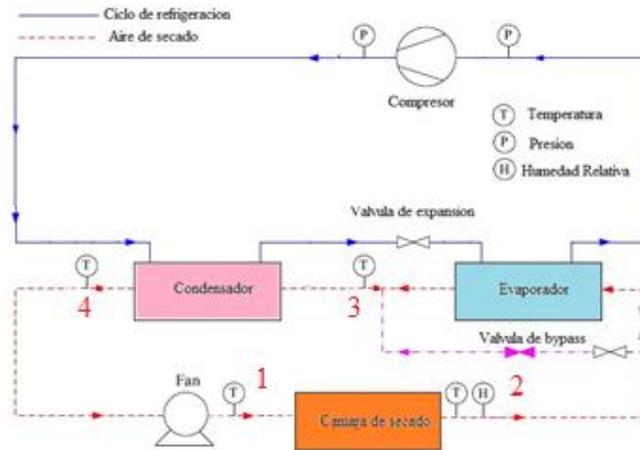
Para el accionamiento de los motores se construyó un tablero de mando, como se muestra en la figura:



**Figura 2-4:** Tablero de accionamiento de la maquina  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020

Se colocó un controlador de temperatura y humedad marca Maxwell TH900, a la salida del aire de la cámara de secado para validar el modelo obtenido.

## 4.2 Puntos de medición de los parámetros de la bomba.



**Figura 3-4:** Puntos de medición de las temperaturas y humedad del aire de secado  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

En la figura 57-3 se indican los puntos donde se colocaron los sensores de temperatura del aire de secado, en los puntos 1,3 y 4 se colocaron sensores de temperatura marca Dolla Tek, que es un monitor de temperatura Digital LCD que consta con un termómetro con sonda externa, su rango de medición es de -50 hasta 110 °C, con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .



**Figura 4-4:** Medidor de temperatura de aire de secado  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

En el punto 2 se colocó el controlador de temperatura Maxwell TH900, con un rango de medición de temperatura de 0 a 60 °C y una humedad relativa de 0 a 95%, posee una precisión de 1% para la temperatura y 5% para la humedad.

Para el sistema de la bomba de calor se colocaron medidores de presión tanto para la línea de baja y alta presión, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 5-4:** Medidor de presión del refrigerante de la bomba de calor  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

### 4.3 Procedimiento para determinar la humedad de las pepas de cacao.

Se realizó una prueba de secado con una masa de 15 Kg de cacao fermentados y se esparcieron dentro de la cámara de secado rotativa. Los ensayos se llevaron a cabo con una temperatura de ingreso de 48 °C y 17% de humedad relativa. El secado terminó cuando las pepas de cacao alcanzaron su humedad de equilibrio (8 %).

#### 4.3.1 Determinación del contenido de humedad.

El contenido de humedad en base seca (X) se determinó cada hora en base al peso de las muestras de pepas de cacao usando la ecuación 35. Se obtuvieron muestras aleatorias de 30 pepas de cacao, cada hora de la cámara de secado. A continuación, se determinó el peso del sólido seco secando las muestras aleatorias en un horno hasta que no exista variación de peso en las muestras obtenidas, este procedimiento se basó según (Hii, Law, & Suzannah, 2012). Además, se utilizó el equipo Wile que es un dispositivo para medir humedad de los granos de cacao, su rango de medición de humedad es del 4 al 20%, con una precisión del  $\pm 5\%$ . (Anexo G).



**Figura 6-4:** Medidor de humedad de los granos de cacao.  
Realizado por: Carlos Zhigui,2020

#### 4.4 Obtención de los datos de las pruebas realizadas.

##### 4.4.1 Obtención de la curva de secado de los granos de cacao con el método tradicional.

Para la obtención de la curva de secado solar se realizó la medición a diez pepas de cacao, se las expuso al sol y se procedió a realizar la pérdida de masa con una balanza digital con una capacidad de hasta 500 gramos con una resolución de 0,01 gramos, en función del tiempo para obtener el porcentaje de humedad en base seca aplicando la ecuación 35.



**Figura 7-4:** Medición de humedad de secado solar.

Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

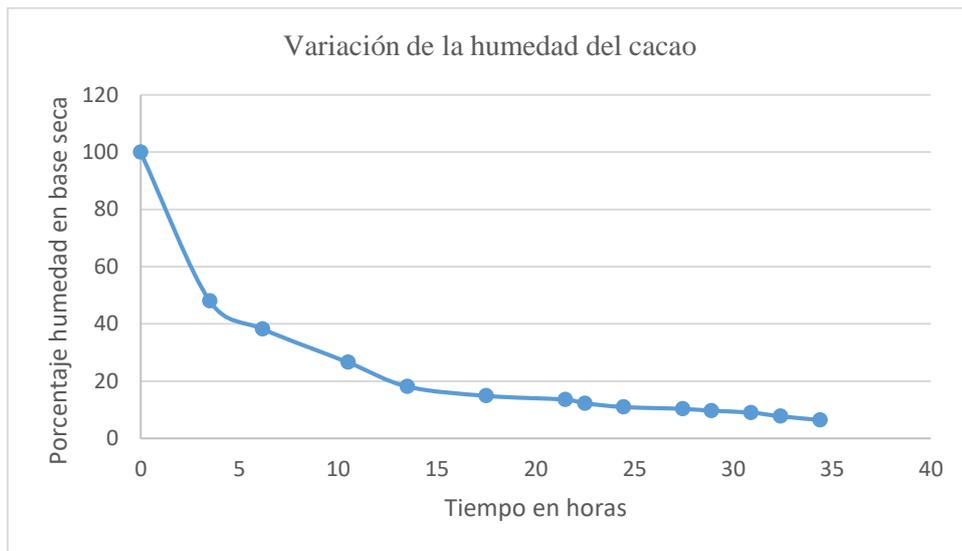
A continuación, se presentan la tabla de secado de las pepas de cacao expuestas al sol

**Tabla 1-4:** Valores de humedad en función del tiempo del secado solar

| Tiempo (minutos) | Humedad base seca (X) |
|------------------|-----------------------|
| 0                | 1                     |
| 210              | 0,481                 |
| 370              | 0,383                 |
| 630              | 0,266                 |
| 810              | 0,182                 |
| 1050             | 0,149                 |
| 1290             | 0,136                 |
| 1350             | 0,123                 |
| 1467             | 0,110                 |
| 1647             | 0,104                 |
| 1734             | 0,097                 |
| 1854             | 0,091                 |
| 1944             | 0,078                 |
| 2064             | 0,065                 |

Realizado por: Carlos Zhigui ,2020

A continuación, se presenta la curva de secado de las pepas de cacao expuestas al sol.

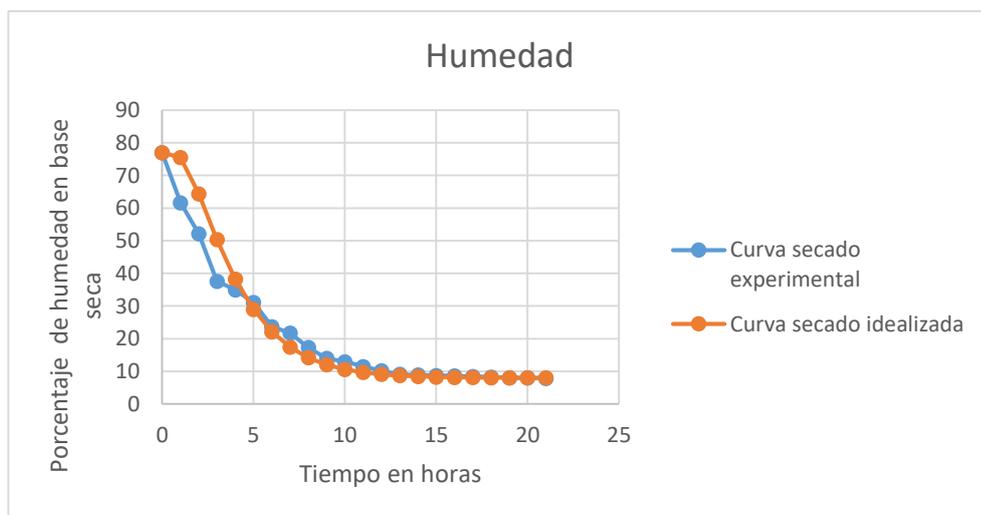


**Gráfico 1-4** Medición de humedad de secado solar.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

La prueba de secado se realizó en el mes de marzo del año 2020, en la Ciudad de Machala con una temperatura ambiente de 28°C y una humedad relativa del aire del 60%, hasta alcanzar la humedad de equilibrio el tiempo fue de 1944 minutos es decir 32,4 horas.

#### 4.4.2 Obtención de la curva de secado de los granos de cacao con la bomba de calor.

Para la obtención de la curva de secado por la bomba de calor se procedió a secar una masa de 15 Kg de cacao fermentado y se obtuvo al final una masa de 8,8 Kg de cacao seco, con una temperatura de ingreso a la cámara de secado de 48°C y una humedad del 17% del aire de secado con un caudal de 0,15 m<sup>3</sup>/s (540 m<sup>3</sup>/h).



**Gráfico 2-4:** Curva de secado experimental vs idealizada.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

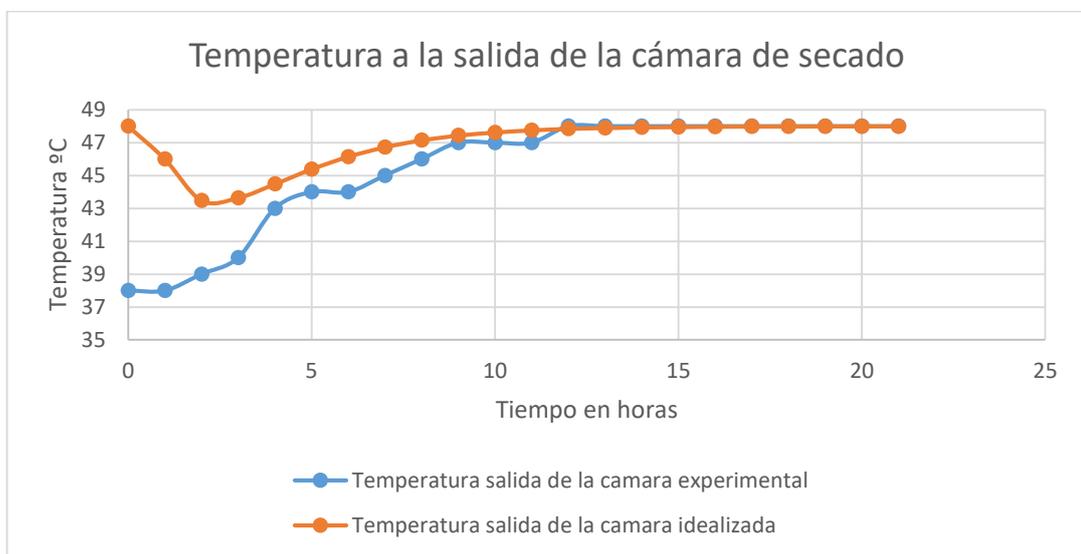
Para calcular el error relativo medio entre el valor experimental y el idealizado se utiliza la siguiente ecuación, según (Hii, Law, & Suzannah, 2012)

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|Valor\ experimental - Valor\ idealizado|}{Valor\ experimental} \quad (125)$$

Dónde N representa el número de medidas tomadas en este caso fueron 21, obteniéndose un error relativo medio del 10,88 %.

#### 4.4.3 Obtención de la curva de temperatura del aire de secado a la salida de la cámara.

La humedad del aire de secado y su temperatura se midieron con el sensor de humedad Maxwell TH900 y se obtuvo las siguientes gráficas y se las comparó con la temperatura y humedad idealizadas.

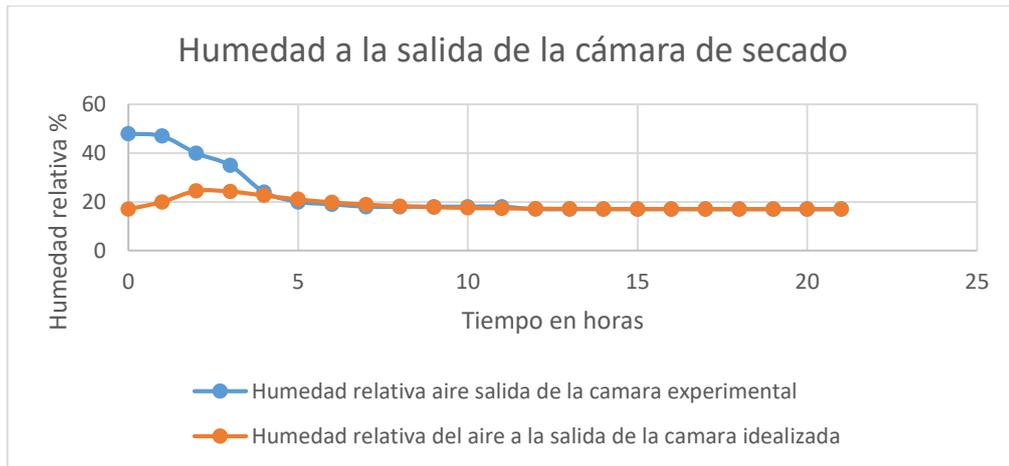


**Gráfico 3-4:** Curva de temperatura a la salida de la cámara de secado.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

Al comparar las gráficas se observa que existe una diferencia de 10 grados entre la experimental y la idealizada en el tiempo cero, esto es debido a que no se considera la transferencia de calor que existe cuando se ingresa el cacao a la cámara de secado, pero a partir de las 6 horas la curva se aproxima a la idealizada. También se calculó el error medio relativo y se obtuvo 4,32 %.

#### 4.4.4 Obtención de la curva de humedad del aire de secado a la salida de la cámara.

A continuación, se indican la gráfica obtenida de la humedad del aire de secado a la salida de la cámara

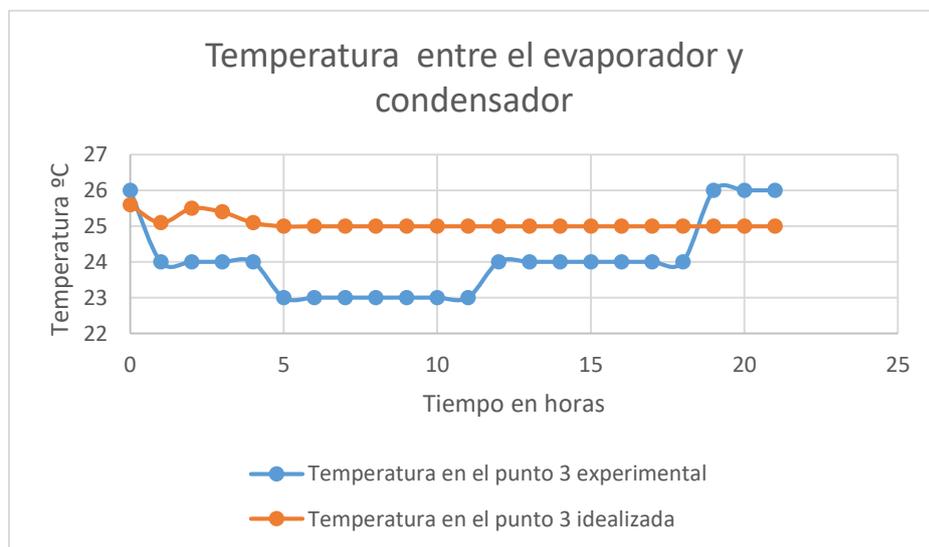


**Gráfico 4-4:** Curva de humedad a la salida de la cámara de secado.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020.

Al calcular el error relativo medio entre los valores experimentales y los idealizados se obtiene un valor de 10,5 %, al observar la curva al inicio existe una diferencia de 31 % de la humedad relativa del aire de secado.

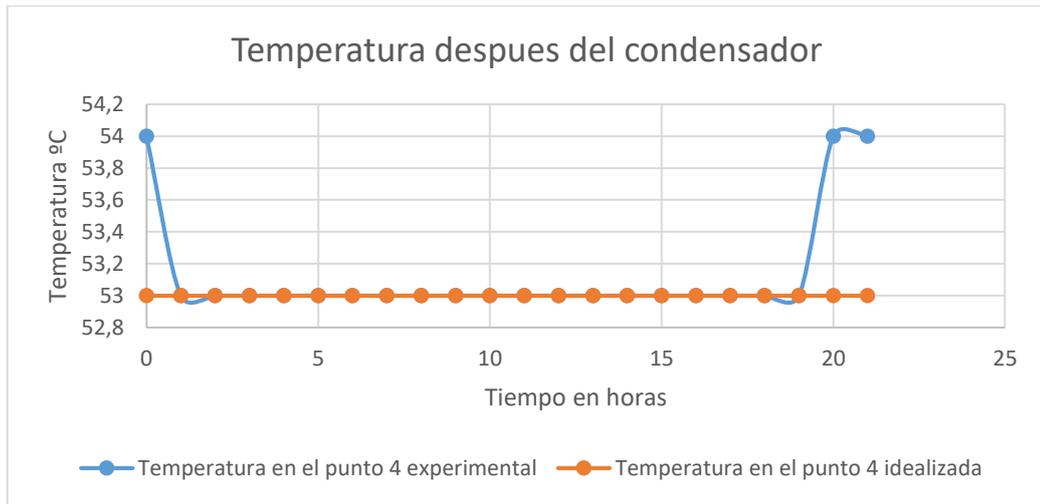
#### 4.5 Temperatura en los conductos de recirculación de aire de secado.

En la siguiente figura se presenta la temperatura medida entre el evaporador y condensador punto 3 de la figura 3-4, con respecto a la idealizada con un caudal de 0,14 m<sup>3</sup>/s obteniéndose error relativo medio de 5,92%.



**Gráfico 5-4:** Curva de la temperatura entre el evaporador y el condensador.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020.

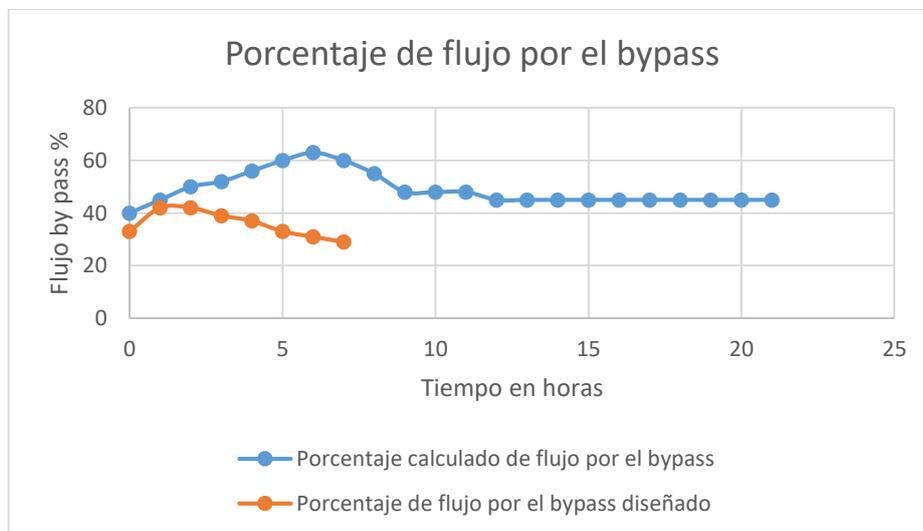
Además, se mide la temperatura después del condensador punto 4, de la figura 3-4 y se compara con la idealizada, los resultados se presentan en la siguiente figura.



**Gráfico 6-4:** Curva de la temperatura después del condensador.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020.

El error relativo medio entre la temperatura medida con la idealizada es de 0,26 %, se obtiene un bajo error porque gracias a la compuerta tipo mariposa para calibrar el caudal se pudo mantener constante la temperatura a la salida del condensador.

Con estos valores se pudo calcular el porcentaje de flujo que circula por el bypass los resultados se presentan en la siguiente figura.



**Gráfico 7-4:** Curva del porcentaje de flujo por el bypass.  
**Realizado por:** Carlos Zhigui,2020.

La curva del porcentaje de flujo diseñada con la calculada con las medidas obtenidas no existe una semejanza, esto es porque se estimaba un caudal de 0,17 m<sup>3</sup>/s, pero en la práctica se está obteniendo un caudal de 0,15 m<sup>3</sup>/s, eso significa que existe más caída de presión que la estimada.

La diferencia entre la temperatura antes y después del ventilador centrífugo puntos 4 y 1 de la figura 3-4 es de 5 °C., es por ello que la temperatura a la salida del condensador es de 53 °C en la entrada a la cámara de secado es de 48 °C.

#### **4.6 Presión del refrigerante en el ciclo de la bomba de calor.**

La presión en el sistema de alta de la bomba de calor medida fue de 350 PSI, lo máximo recomendable para los sistemas que trabajan con refrigerante R22, esto ocurre porque el caudal que circula por el evaporador y condensador es más bajo de lo diseñado. Esto limita la capacidad a secar del prototipo a una masa de cacao húmedo de 15 Kg, que son los resultados presentados en esta tesis.

#### **4.7 Comparación entre el secado solar y el secado por bomba de calor.**

##### ***4.7.1 Consumo energético del prototipo de sistema de la bomba de calor.***

El consumo de corriente de cada motor que acciona el sistema se describe a continuación con una fuente de alimentación de 220 Voltios.

- Motor de accionamiento del ventilador centrífugo 2 Amperios.
- Motor del compresor de la bomba de calor 4 Amperios
- Motor que acciona el tambor rotativo 0,5 Amperios.

El sistema total consume 6,5 Amperios a plena carga con la fuente de alimentación de 220 Voltios la energía consumida es 1,43 KW, considerando el costo del KW\*hora de 10 centavos de dólar y el tiempo que estuvo funcionando la bomba fue de 21 horas, por ende, el costo es de 3 dólares. Si se compara con el secado solar el costo es de cero dólares.

El COP de la bomba de calor es de 3,97, debido a que se utiliza un aire acondicionado tipo ventana de 12000 BTU, al convertirlo en Kw es de 3,5 y el compresor consume 880 watts.

En este caso se puede incluir la influencia del aislante térmico instalado, como se calculó anteriormente sin aislante se podría haber tenido un tiempo mayor de 22 minutos, que sumando al tiempo con las pruebas realizadas sería de 21,36 horas que equivale a un costo de \$3,05, es decir 5 centavos más por cada secado.

##### ***4.7.2 Porcentaje de reducción del tiempo de secado al sol y por la bomba de calor.***

En el secado solar el tiempo hasta obtener la humedad requerida del 8% es de 32,4 horas, pero se le debe restar el tiempo debido a que no inician a la misma humedad esto es de 2 horas, dando un tiempo de secado de 30,4 horas, mientras que con la bomba de calor se reduce a 21 horas, dando un porcentaje de reducción del 30 %. En la siguiente figura se presentan las pepas de cacao a la

izquierda antes del proceso de secado de cacao (húmedas) y a la derecha después del proceso de secado.



**Figura 8-4:** Pepas de caco húmedas y secas.  
Realizado por: Carlos Zhigui, 2020.

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre el secado por bomba de calor y el secado solar.

**Tabla 2-4:** Diferencia entre el sistema secado por bomba de calor y solar.

| Secado por bomba de calor   | Secado tradicional (solar)  |
|---|---|
| <p><b>Consumo y Costo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor de accionamiento del ventilador centrifugo 2 Amperios.</li> <li>• Motor del compresor de la bomba de calor 4 Amperios</li> <li>• Motor que acciona el tambor rotativo 0,5 Amperios.</li> </ul> <p>El sistema total consume 6,5 Amperios a plena carga con la fuente de alimentación de 220 Voltios la energía consumida es 1,43 KW*hora.<br/>Costo es de 3 dólares.<br/>COP del sistema por bomba de calor: 3,97</p> | <p><b>Consumo energía y costo</b></p> <p>Cero consumos de energía eléctrica y cero dólares de costo</p>   |
| <p><b>Tiempo empleado:</b> 21 horas, 8 horas cada día hace un total de 2 días, 5 horas y se obtiene una masa de 8,8 Kg de cacao seco.</p>   | <p><b>Tiempo empleado:</b> 32 horas, 8 horas cada día un total de 4 días, esto ocurre de enero a junio. En los meses de Julio a Diciembre se puede demorar hasta 15 días.</p> |

Realizado por: Carlos Zhigui ,2020

Se valora las variables descritas en la tabla 2-1 del primer capítulo.

**Tabla 3-4:** Determinación de la hipótesis, valoración de variables.

| VARIABLE             | VALOR  | CRITERIO DE EVALUACIÓN  | HIPOTESIS ACEPTADA/ RECHAZADA |
|----------------------|--|---|-------------------------------|
| Diseño del prototipo | Plano de conjunto y despiece de la bomba de calor.<br>En total se utilizaron 118 ecuaciones. | Las ecuaciones utilizadas permiten establecer las dimensiones y componentes a utilizar en el sistema por bomba de calor, en base a esta se realiza el dibujo del prototipo. | Aceptada                      |

|   |  |   |           |
|---|--|---|-----------|
| Construcción del prototipo                      | Curva de secado experimental vs idealizada, Grafica 2-4, se obtuvo un error relativo medio del 10,88 %.  | Se tomaron 21 medidas para determinar el error medio relativo según lo plantea (Hii, Law, & Suzannah, 2012)   | Acceptada |
| Características técnicas del proceso de secado. | <p>Se realiza la medición de la temperatura del aire de secado, el amperaje nominal que consume el sistema por bomba de valor y la presión en las líneas de baja y alta presión.</p> <p>Los parámetros que se calcularon son: la velocidad del aire y a su vez se obtiene el caudal que circula por los ductos, y con los valores obtenidos de la presión en el ciclo de la bomba de calor se obtiene la temperatura del refrigerante.</p> | <p>Para la medición de la temperatura del aire de secado se utiliza el controlador de temperatura y humedad marca Maxwell TH900 y sensores de temperatura marca Dolla Tek. La medición de corriente se mide con un amperímetro para corriente alterna.</p> <p>Para la presión del refrigerante que utiliza la bomba de calor se usó manómetros cuyo rango es de 0 a 800 PSI.</p> <p>Con los valores de la temperatura y humedad del aire a la salida de la cámara de secado y con la ayuda de la tabla psicométrica, se puede obtener el caudal y con la sección de los ductos se establece la velocidad del aire de secado.</p> <p>Los valores de presión permiten determinar la temperatura del refrigerante y a la vez establecer los valores críticos del sistema por bomba de calor.</p> | Acceptada |
| Humedad de los granos de cacao                  | Se obtiene una humedad del 8 %   | Se comprobó con el equipo Wile que es un dispositivo para medir humedad de los granos de cacao, su rango de medición de humedad es del 4 al 20%, con una precisión del $\pm 5\%$ .  | Acceptada |
| Materiales                                      | Para el sistema de secado por bomba de calor los principales componentes son: Un aire acondicionado de 12000 BTU y un Ventilador centrifugo DA 9-9 4P 300, sus   | El sistema de bomba de calor es monitoreado por la presión en el sistema de alta y máxima recomendada para los refrigerantes R22.   | Acceptada |

|                  |   |  |           |
|------------------|---|--|-----------|
|                  | especificaciones técnicas están disponibles en el Anexo E y F.  | El ventilador centrífugo que se utilizó proporciona un caudal de 600 m <sup>3</sup> /h y podrá vencer una presión de 400 Pascales, pero al realizar las pruebas se necesita un ventilador de 800 m <sup>3</sup> /h y la presión a vencer es de 600 Pascales. |           |
| Tiempo de secado | En las gráficas 1-4 y 2-4 se obtiene las curvas de secado en función del tiempo, tanto del secado al sol y por el sistema de la bomba de calor respectivamente. | Se logra una reducción del 30 % del tiempo en relación con el secado al sol.   | Acceptada |

#### 4.8 Costo del prototipo.

El costo total del proyecto se define en la tabla 4-4, donde se calcula una inversión de 2780 dólares.

**Tabla 4-4: Costo del prototipo**

| DESCRIPCIÓN  | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|--|----------|----------------|-------------|
| Cámara de secado   | 1        | 100            | 100         |
| Aire acondicionado usado como bomba de calor                                       | 1        | 300            | 300         |
| Tablero de mando, consta de los sensores de temperatura, humedad, botones de mando | 1        | 600            | 600         |
| Ventilador centrífugo  | 1        | 400            | 400         |
| Construcción de los ductos de recirculación del aire de secado                     | 1        | 250            | 150         |
| Horas hombre   | 176      | 5              | 880         |
| Elaboración de documentación   | 1        | 50             | 50          |
| Imprevistos  | 1        | 300            | 300         |
| <b>TOTAL</b>   |          |                | <b>2780</b> |

El prototipo construido del sistema de bomba de calor está en la capacidad de secar 8,8 Kg en 21 horas, con un ventilador de 540 m<sup>3</sup>/h y 420 Pascales de presión, el costo de la fabricación del prototipo es de 2780 dólares. Pero el sistema de bomba de calor sin considerar la cámara de secado está en la capacidad de obtener 100 Kg de cacao seco con un caudal de 900 m<sup>3</sup>/h y 600 Pascales de presión, en un tiempo de 24 horas, con una humedad inicial en base seca del 100 %, esto se obtiene del modelo numérico establecido, por lo que se deberá construir una cámara de secado para esta capacidad, también se debe cambiar el ventilador centrífugo, cuyo costo actual en el mercado es de 1000 dólares.

Al productor le cancelan por cada lata actualmente a 15 dólares, las seis latas (90 dólares) equivalen a 1 quintal de cacao seco que actualmente está a 97 dólares, lo que equivale a 7 dólares menos por quintal, un pequeño productor generalmente posee 3 hectáreas de cacao y que cada hectárea produce en promedio 30 quintales de cacao seco por año, por lo que se deja de percibir 630 dólares. En cuatro años 5 meses se recuperaría el dinero invertido en el presente prototipo.

Se consultó una secadora SIRCA mod. SR-10-SI para cacao (ANEXO D), cuyo costo es de 2500 más IVA, para obtener 245 kilogramos de cacao seco (10 quintales cacao húmedo), donde el tiempo de secado es de 21 horas, el consumo de gas es de 3 Kg por hora y el consumo energía eléctrica es de 1,5 KW por hora, originando un costo de 31,02 dólares (30,87 por el costo del gas y 0,15 el costo de la energía eléctrica), considerando un tanque de gas de 45 kilogramos a un costo de 22 dólares el cilindro y el costo de la energía eléctrica a 10 centavos de dólar el KW\*h. si se considera los cilindros de gas subsidiados el costo reduce a 12,75 dólares.

Al ingresar los datos en el modelo numérico realizado para obtener la misma masa de 245 kilogramos de cacao seco se requerirá una bomba de calor de 36000 BTU (10,55 KW) y un ventilador centrifugo de 3600 m<sup>3</sup>/h con una presión de 600 Pascales con un área transversal de la cámara de secado de 3 m<sup>2</sup> y una longitud de 1,5 metros según la fórmula 88 del capítulo 2 y secaría en 24 horas, considerando el COP de 3,97 el consumo sería de 2,66 KW por 24 horas que dura el secado da 63,84 KW\*h a 10 centavos de dólar es de 6,38 dólares. El ventilador a usar sería un CRL-1135-2T-3 IE3 (ANEXO F), que consume 2,2 KW por las 24 horas 52,8 KW\*h lo que origina un costo de 5,28 dólares, que sumado el costo de la energía de la bomba de calor da un costo total de 11,66 dólares, al compararlo con la secadora industrial tiene una reducción del 166 %, utilizando el gas para uso industrial de 45 Kg y al compararlo con el gas subsidiado es una reducción del 9%, el costo de la energía eléctrica se puede reducir, si se observa la gráfica 3-4, a partir de las 11 horas se puede aprovechar la recirculación del aire.

Si se considera solo el costo de la bomba de calor de 36000 BTU es de 700 dólares y el ventilador a usar tiene un costo actual de 1500 dólares, más el costo de 1780 tomados de la construcción del presente prototipo suman 3980 dólares, y una máquina secadora a gas cuesta 2500 dólares más IVA, esto implica un costo mayor el de una bomba de calor en 1480 dólares.

Al comparar el costo de construcción de una secadora por bomba de calor es mayor, pero en consumo de energía al compararlo con el gas de uso industrial se tiene una reducción del 191 %.

#### **4.9 Trabajos futuros**

La bomba de calor en el presente prototipo funciona continuamente es por ello que se obtuvo el costo de 3 dólares en un tiempo de 21 horas, pero al observar el gráfico 3-4 en lo que refiere a la temperatura de salida del aire de la cámara de secado, se puede implementar un sistema

controlador que permita activar la bomba de forma intermitente, a partir de las 11 horas de funcionamiento para aprovechar la recirculación del aire y con ello se reduciría el consumo de energía eléctrica, es por ello que se adquirió el controlador Maxwell TH 900 que me permite realizar esta operación.

En la presente tesis el motivo de que no se puede secar más de 15 Kg de cacao húmedo, es por el ventilador centrífugo, aquí cabe recalcar que se investigó la bibliografía sobre la caída de presión que ocurre en una cámara de secado con cacao y no se encontró, pero se usó la fórmula de (Gutiérrez Flórez & Copete López, 2009), que establece la caída de presión en una cámara de secado con café pergamino. Es por ello que es necesario establecer la caída de presión en este tipo de sistemas para cacao en función de su humedad, se debería colocar sensores de presión diferencial a la entrada y salida de la cámara de secado para determinarla.

Realizar un controlador que permita la manipulación automática del flujo de aire de secado para mantener la temperatura constante a la salida del condensador, en el presente prototipo este tipo de accionamiento es manual.

## CONCLUSIONES

- El modelo numérico planteado para obtener la curva de la variación de la humedad de las pepas de cacao en función del tiempo se obtuvo de resolver las ecuaciones diferenciales parciales basadas en la segunda ley de Fick y la ecuación de conducción de calor de Fourier por elementos finitos utilizando Matlab, a estas resoluciones se añadieron las propiedades del aire húmedo y el balance de masa en un secador para obtener el modelo planteado de secado y poder predecir además el comportamiento de la temperatura y la humedad del aire de secado dentro de la cámara. Al comparar este modelo idealizado con las pruebas experimentales de secado se obtuvo un error relativo medio del 10,88 %.
- El error relativo medio entre el modelo matemático establecido a la salida del proceso de secado con respecto a su temperatura fue de 4,32 % y el error medio relativo en la humedad relativa del aire a la salida del proceso de secado fue de 10,5 %, la mayor diferencia se produce al inicio del proceso, esto puede ser debido a que no se consideró la transferencia de calor al momento de ingresar las muestras de cacao a la cámara de secado.
- El bypass diseñado permitió mantener la temperatura a la salida del condensador constante con una variación del porcentaje de flujo del 40% al 60 %, esto se cumple con la masa de cacao húmedo de 15 Kg y con un caudal de 540 m<sup>3</sup>/h, estos datos fueron calculados en función de las temperaturas medidas.
- La masa máxima que permite secar el prototipo es de 15 Kg de cacao húmedo, esto se debe a que la caída de presión calculada a vencer por el ventilador centrifugo es superior a la que se origina en el proceso de secado, al recalcular se estima que se necesita un ventilador que genere 900 m<sup>3</sup>/h y la presión a vencer es de 600 Pascales, este ventilador sería el adecuado para el proceso.
- Al utilizar el modelo realizado del sistema de la bomba de calor y compararlo con una máquina secadora comercial que utiliza gas de uso industrial como combustible para obtener 245 Kg de cacao seco la diferencia en costo es de 22,34 dólares menor que con la secadora a gas lo que equivale en porcentaje una reducción del 191 %, pero si se utiliza gas subsidiado el costo se reduce en un 35%, por cada proceso de secado o parada como la saben llamar.

## RECOMENDACIONES.

- Para la selección correcta de un ventilador centrífugo en un sistema de bomba de calor con recirculación de aire se debe investigar la caída de presión del aire de secado en estos sistemas, pues no se encontró investigaciones con respecto a este tema, es por ello que se utilizó un estudio realizado de la caída de presión en una cámara de secado con café pergamino.
- Para optimizar el prototipo en lo que respecta al consumo de energía se debe seguir investigando con la implementación de un sistema que controle el accionamiento intermitente de la bomba de calor cuando la temperatura de la salida de la cámara de secado se iguale con la temperatura de ingreso, con esto se provecharía la recirculación del aire.
- Se recomienda implementar un sistema que controle automáticamente el flujo que circula por el bypass, porque en el prototipo se lo realiza manualmente, para mantener constante la temperatura a la salida del condensador.
- Para optimizar el prototipo se debe seguir investigando en la influencia del material aislante en la eficiencia de la secadora de cacao rotativa, para la reducción del costo de este proceso.
- Se debe seguir investigando para determinar la rigidez de una pepa de cacao, para así con este dato establecer los parámetros de contacto entre una pepa de cacao y un tambor rotativo para optimizar su diseño y así evitar que las pepas de cacao sean deformadas en el proceso de secado, debido a que este dato no se encontró en investigaciones en nuestro medio, por ello se vio la necesidad de realizar un experimento aplicando la teoría de contacto de Hertz y la física clásica.

## BIBLIOGRAFÍA

Anecacao. (2016, diciembre 1). Sabor Arriba. (D. Arosemena, Ed.) Revista especializada en cacao, 37. Retrieved agosto 11, 2018, from <http://www.anecacao.com/index.php/es/revista/decima-edicion-diciembre-2016.html>

Asociación de fabricantes españoles de lanas minerales aislantes AFELMA. (n.d.). Guía de buenas prácticas en el asilamiento industrial. Madrid: Graficas Arias Montano S.A.

Cairox Airvance. (n.d.). Cairox Airvance Group. Retrieved from [https://www.cairox.be/pdf/BE/DS/out/BE-EN-I04.005.D-DA\\_ERP\\_2015.pdf](https://www.cairox.be/pdf/BE/DS/out/BE-EN-I04.005.D-DA_ERP_2015.pdf)

Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa. México: Mc Graw Hill.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). Termodinámica. México: Mc Graw Hill.

Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). Método numérico para Ingenieros. México: Mc Graw Hill.

Chinenye, N. M., Ogunlowo, A., & Olukunle, O. (2010). Cocoa Bean (*Theobroma cacao* L.) Drying Kinetics. Chilean Journal of Agricultural Research, 70(4), 633-639. Retrieved Agosto 15, 2018, from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/chiljar/v70n4/at14.pdf>

Chua, K. J. (2000). Dynamic modelling, experimentation, and optimization of heat pump drying for agricultural products. Ph.D. thesis, National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering.

Donev, A., Cisse, I., Sachs, D., Variano, E. A., Stillinger, F. H., Connelly, R., . . . Chaikin, P. M. (2004). Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids. *Science*, 990-993. doi:10.1126/science.1093010

Duran Oscuez, C. G. (2014). Desarrollo de una Técnica Lagrangiana para el Dimensionamiento y Análisis Paramétrico de Secadores Rotativos. Tesis de Grado Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/25211>

Estudios Energéticos Para Mantenimiento, S.L. (2020, Julio 25). <http://www.eepm.es/>. Retrieved from <http://www.eepm.es/wp-content/uploads/2018/04/PRESSMAN-Perdida-de-Carga-en-Tuberías.pdf>

Faborode, M. O., & Dinrifo, R. R. (1994). A mathematical model of cocoa pod deformation based on hertz theory. *Agrophysics*, 8, 403-409.

Fagunwa, A., Koya, O., & Faborode, M. (2009, Julio). Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. *Agricultural Engineering International*, XI (1292). Retrieved Agosto 16,

2018, from [http://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files\\_mf/fagunwa2009.pdf](http://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/fagunwa2009.pdf)

Giesbers, J. (2012). Contact Mechanics In Msc Adams. University of Twente.

Guerrero H., G. (2017). Revista Lideres. Retrieved agosto 14, 2019, from [www.revistalideres.ec](http://www.revistalideres.ec): <https://www.revistalideres.ec/lideres/cacao-ecuatoriano-historia-empezo-siglo.html>

Gutiérrez Flórez, J. M., & Copete López, H. (2009). Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia. *Tecno Lógicas*, 23, 109-132.

Hii, C. L., Law, C. L., & Suzannah, S. (2012). Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. *Journal of Food Engineering*, 108, 272-282.

Hii, C., Law, C., & Law, M. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54, 264-271.

Ibarra Echeverría, M., Núñez Solís, E., & Huerta Ibáñez, J. M. (2010). Manual de aceros inoxidables. Cerrillos: 2M Impresores Ltda.

Isover Saint-Gobain. (2009). Manual de conductos de aire acondicionado. Saint-Gobain Cristalería, S.A. - División Aislamiento.

Komolafe, C., Adejumo A., O., Awogbemi, O., & Adeyeye, A. (2014). Development of a cocoa beans batch dryer. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 3, 171-176. Retrieved Agosto 15, 2018, from [http://www.ajer.org/papers/v3\(9\)/W03901710176.pdf](http://www.ajer.org/papers/v3(9)/W03901710176.pdf)

Koua, B. K., Ekoun Koffi, P. M., & Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Science Direct*, 18, 72-82.

LG. (n.d.). LG Life's Good. Retrieved Enero 12, 2019, from <https://www.lg.com/ec/aires-acondicionados-residenciales/lg-W121CM>

Lisboa, M. H., Vitorino, D. S., Delaiba, W. B., D. Finzer, J. R., & S. Barrozo, M. A. (2007). A Study of particle motion in rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24, 365-374.

López Chica, J. (2015). Desarrollo de un sistema de secado de cacao de aroma, utilizando combustible convencional y energía renovable. Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

Minea, V. (2013). Drying heat pumps - Part I: System integration. Elsevier, 36, 643-658.

Mujumbar, A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying. CRC Press.

- Núñez Solano, S. J. (2017). Automatización de los procesos de secado y selección del cacao ecuatoriano conservando las características sensoriales y previniendo riesgos laborales. Tesis Doctoral en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Retrieved Agosto 20, 2018, from <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/6841>
- Perussello, C. A., Mariani, V. C., & Camargo do Amarante, A. C. (2012). Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying. *SciVerse ScienceDirect*, 48, 325-331.
- Plange, A. B., & Baryeh, E. A. (2003). The physical properties of Category B cocoa beans. *Elsevier*, 60, 219-227.
- Ponce de la Cruz, R. I., Royo, F. J., & García Reynoso, A. C. (2018). Modelo matemático de un secador rotatorio: secado de biomasa sólida lignocelulosa. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, VI, 31-43.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. R., & Cho, Y. I. (1998). *Handbook of heat transfer* (Tercera ed.). New York: McGraw-Hill.
- Romero-Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del Trabajo*, 105-114.
- Sarpong Amoah, R., Ekow Abano, E., & Kwaku Anyidoho, E. (2015). The effects of moisture content and loading orientation on some physical and mechanical properties of “tafo hybrid” and “amelonado” cocoa beans. *Journal of Food Process Engineering*. doi:10.1111/jfpe.12348
- Shengchun, L., Xueqiang, L., Mengjie, S., Hailong, L., & Zhili, S. (2018). Experimental investigation on drying performance of an existed enclosed fixed frequency air source heat pump drying system. *Applied Thermal Engineering*, 130, 735-744.
- SODECA. (n.d.). SODECA. Retrieved Julio 25, 2020, from <https://www.sodeca.com/es/tecnica>
- Soto Francés, V. M., Sarabia Escriva, E. J., Carnero Melero, P., & Pinazo Ojer, J. M. (2018). *Psicometría aplicada a la climatización. Bases teóricas y problemas*. España: Universitat Politècnica de Valencia.
- Teneda Llerena, W. F. (2016). *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao (Theobroma cacao L.) Variedad Nacional y Variedad CCN51*. Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía. Retrieved from <https://www.unia.es/busqueda-por-ano/item/proceso-de-fermentacion-del-cacao>

Toro Mesa, F. J. (n.d.). Análisis de herramientas informáticas para el diseño de redes de conductos en climatización. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4176/direccion/>

Ullauri Armijos, W. A. (2015). Análisis del sistema de comercialización del cacao y su incidencia en los ingresos del productor. Tesis Maestría Gerencia y Mercadeo Agropecuario, Universidad de Guayaquil, Guayaquil.

Universidad Nacional del Sur. (2013). Interacción entre partículas y sólidos. Buenos Aires. Retrieved from <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo4.pdf>

Valdés, M. F. (2017). Software para el dimensionamiento de condensadores y evaporadores en bombas de calor aire/aire. Universidad Politécnica de Madrid, Ingeniería Energética y Fluido mecánica, Madrid.

Vásquez Tantas, G. (2017). Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao. Tesis Ingeniero Mecánico, Universidad de Piura. Retrieved agosto 20, 2018, from [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3234/IME\\_227.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3234/IME_227.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Vega Arnao, R. A., & Martínez Salazar, W. A. (2015). Diseño e implementación de un sistema rotatorio de flujo constante para secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. Retrieved agosto 15, 2018, from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10436/1/UPS-GT001528.pdf>

Vera Chang, J., Vallejo Torres, C., Párraga Moran, D., Morales Rodríguez, W., Macías Veliz, J., & Ramos Remache, R. (2014, junio). Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Retrieved agosto 20, 2019, from [http://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2\\_en%20construccion.pdf](http://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2_en%20construccion.pdf)

Villamar de Borrero, F., & Hernández H., J. E. (n.d.). Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (*Theobroma cacao*). 6-12.

Zabalaga Davila, R. F. (2016). Mathematical modeling of drying process of unripe banana slices. Tesis Doctoral, Escola Politécnica of University of Sao Paulo, Sao Paulo.

## ANEXOS

### ANEXO A. Medidas tomadas de las 100 pepas de cacao

| Número | a     | b     | c     | V elipsoide mm <sup>3</sup> | masa (gramos) |
|--------|-------|-------|-------|-----------------------------|---------------|
| 1      | 28,24 | 10,9  | 15,8  | 2715,43                     | 3,12          |
| 2      | 24,92 | 11,6  | 15,24 | 2459,69                     | 2,78          |
| 3      | 24,3  | 11,18 | 14,7  | 2229,75                     | 2,64          |
| 4      | 22,72 | 11,12 | 15,34 | 2163,86                     | 2,61          |
| 5      | 24    | 10,1  | 13,32 | 1802,72                     | 2,45          |
| 6      | 21,58 | 12,2  | 15,8  | 2322,52                     | 2,85          |
| 7      | 22,32 | 12,72 | 13,78 | 2184,35                     | 2,3           |
| 8      | 24,48 | 8,18  | 14,24 | 1592,08                     | 2,32          |
| 9      | 25,82 | 9,8   | 13,68 | 1932,67                     | 2,62          |
| 10     | 27,72 | 10,78 | 15,4  | 2569,35                     | 3,47          |
| 11     | 23,62 | 10,3  | 14,06 | 1909,82                     | 2,49          |
| 12     | 25,32 | 10,74 | 13,72 | 2083,12                     | 2,86          |
| 13     | 23,88 | 9,42  | 14,78 | 1856,31                     | 2,6           |
| 14     | 22,26 | 10,32 | 15,3  | 1962,39                     | 2,87          |
| 15     | 26,1  | 10,94 | 14,28 | 2276,55                     | 3,08          |
| 16     | 25,32 | 10,28 | 15,2  | 2208,97                     | 3,08          |
| 17     | 25,14 | 13,86 | 13,94 | 2711,95                     | 3,1           |
| 18     | 20,8  | 11,4  | 15,3  | 2025,58                     | 2,91          |
| 19     | 24,72 | 9,18  | 14,72 | 1865,04                     | 2,99          |
| 20     | 23,14 | 11,18 | 15,42 | 2227,31                     | 3,01          |
| 21     | 21,3  | 7,62  | 11,58 | 1049,38                     | 1,34          |
| 22     | 26,1  | 9,92  | 14,4  | 2081,64                     | 2,86          |
| 23     | 24,68 | 9,68  | 14,4  | 1920,76                     | 2,82          |
| 24     | 26    | 11,72 | 13,92 | 2368,27                     | 3,27          |
| 25     | 26,3  | 12,66 | 14    | 2602,601885                 | 3,62          |
| 26     | 26,3  | 9     | 15,78 | 2085,43                     | 2,82          |
| 27     | 22,46 | 11,1  | 12,82 | 1784,48                     | 2,48          |
| 28     | 23,12 | 10,88 | 13,4  | 1881,97                     | 2,74          |
| 29     | 26,28 | 11,42 | 13,58 | 2275,52                     | 3,34          |
| 30     | 23,4  | 13,12 | 14,62 | 2506,04                     | 3,23          |
| 31     | 26,68 | 9,82  | 15,1  | 2208,84                     | 3,17          |
| 32     | 25,2  | 9,7   | 14,04 | 1916,15                     | 3,08          |
| 33     | 25    | 12,4  | 14,5  | 2509,69                     | 3,38          |
| 34     | 23    | 12    | 12    | 1849,19                     | 2,56          |
| 35     | 21,2  | 13,26 | 13,24 | 2078,06                     | 2,17          |
| 36     | 25,88 | 11,12 | 14,7  | 2361,98                     | 3,59          |
| 37     | 24    | 8,88  | 14,72 | 1751,55                     | 2,52          |
| 38     | 26    | 11,18 | 13,62 | 2210,46                     | 3,06          |
| 39     | 27,22 | 9,76  | 15,12 | 2242,75                     | 3,56          |
| 40     | 21,44 | 10,8  | 13,26 | 1714,28                     | 2,34          |
| 41     | 22,28 | 10,62 | 15,6  | 2060,89                     | 3,05          |

|    |       |       |       |         |      |
|----|-------|-------|-------|---------|------|
| 42 | 23    | 9,7   | 13,64 | 1699,04 | 2,49 |
| 43 | 23,68 | 10    | 15    | 1983,19 | 2,9  |
| 44 | 25,74 | 10,8  | 14,34 | 2225,73 | 3,44 |
| 45 | 25,76 | 10,76 | 14,8  | 2290,39 | 3,39 |
| 46 | 25,76 | 9     | 16,64 | 2153,93 | 3,34 |
| 47 | 23,44 | 11,8  | 14,54 | 2245,40 | 3,1  |
| 48 | 27,86 | 9,84  | 15,5  | 2372,46 | 3,59 |
| 49 | 17,34 | 8     | 12,62 | 977,44  | 1,84 |
| 50 | 24,72 | 12,16 | 14,24 | 2389,91 | 3,14 |
| 51 | 25,68 | 9     | 14    | 1806,57 | 3    |
| 52 | 26,14 | 11    | 13,74 | 2205,85 | 3,23 |
| 53 | 25,5  | 10,86 | 14,6  | 2257,43 | 3,22 |
| 54 | 24    | 11,5  | 14,08 | 2169,71 | 3,09 |
| 55 | 26    | 9,66  | 15    | 2103,45 | 2,75 |
| 56 | 25,24 | 12,38 | 13,92 | 2428,51 | 3,36 |
| 57 | 25,6  | 10,8  | 14,2  | 2192,01 | 2,97 |
| 58 | 25,54 | 13,4  | 13,88 | 2652,19 | 3,3  |
| 59 | 22,86 | 11,9  | 13    | 1974,49 | 3,06 |
| 60 | 23,12 | 10,14 | 14,42 | 1887,48 | 2,48 |
| 61 | 24,46 | 9,74  | 13,84 | 1840,95 | 2,76 |
| 62 | 27,1  | 10,2  | 14,78 | 2281,05 | 3,17 |
| 63 | 26,38 | 10,9  | 14,74 | 2366,40 | 3,89 |
| 64 | 26,54 | 10,32 | 14,3  | 2186,79 | 3,1  |
| 65 | 23,3  | 11,6  | 14,18 | 2139,84 | 2,91 |
| 66 | 21,6  | 8,2   | 15,26 | 1509,08 | 2,2  |
| 67 | 25,26 | 10,4  | 15,2  | 2229,46 | 3,01 |
| 68 | 24,2  | 10,76 | 16,5  | 2398,84 | 3,46 |
| 69 | 22,42 | 11,6  | 15,64 | 2271,01 | 3    |
| 70 | 24    | 11,78 | 13,14 | 2074,16 | 2,91 |
| 71 | 24,6  | 12,06 | 12,36 | 2047,35 | 3,07 |
| 72 | 27,34 | 10    | 13,4  | 2045,47 | 3,1  |
| 73 | 23,3  | 9     | 13,94 | 1632,18 | 2,57 |
| 74 | 25,78 | 12,86 | 14,6  | 2702,51 | 3,94 |
| 75 | 26,16 | 11    | 14,54 | 2336,07 | 3,47 |
| 76 | 24,9  | 8,62  | 13,8  | 1653,77 | 2,33 |
| 77 | 22,5  | 9,14  | 13    | 1492,66 | 2,29 |
| 78 | 25,74 | 9,62  | 15,58 | 2153,98 | 3,25 |
| 79 | 27,9  | 11,6  | 14    | 2529,77 | 3,56 |
| 80 | 26,88 | 11    | 14,9  | 2459,79 | 3,51 |
| 81 | 26,72 | 12,5  | 13,1  | 2442,91 | 3,52 |
| 82 | 26    | 10    | 14,92 | 2165,87 | 3,45 |
| 83 | 24,9  | 12,5  | 12,8  | 2224,38 | 3    |
| 84 | 23,7  | 10,9  | 13,88 | 2001,96 | 3,13 |
| 85 | 22,56 | 10    | 12,92 | 1627,39 | 2,34 |
| 86 | 23,7  | 11    | 13,74 | 1999,94 | 3,01 |

|     |       |       |       |         |      |
|-----|-------|-------|-------|---------|------|
| 87  | 25,3  | 12,3  | 14,72 | 2557,55 | 3,55 |
| 88  | 24,96 | 12,76 | 12,78 | 2272,57 | 3    |
| 89  | 27,46 | 8,88  | 16,68 | 2270,91 | 3,4  |
| 90  | 23,72 | 11    | 14    | 2039,51 | 2,86 |
| 91  | 25,3  | 9     | 16,3  | 2072,24 | 2,92 |
| 92  | 26,48 | 10,36 | 15,64 | 2395,55 | 3,56 |
| 93  | 23,7  | 11    | 14,88 | 2165,88 | 3,15 |
| 94  | 26,36 | 9,9   | 15,7  | 2287,55 | 3,35 |
| 95  | 28,46 | 11,82 | 13,34 | 2505,52 | 3,5  |
| 96  | 25    | 11,5  | 14,46 | 2321,11 | 3,62 |
| 97  | 24    | 11,78 | 14,1  | 2225,69 | 3,1  |
| 98  | 26,7  | 9,7   | 14,84 | 2145,89 | 3,09 |
| 99  | 23,46 | 11,14 | 12,76 | 1861,89 | 2,88 |
| 100 | 24,2  | 11,1  | 13,14 | 1970,72 | 2,71 |

## ANEXO B. Programación realizada en Matlab para el secado de caco sin considerar la humedad del aire.

```
clc;
clear;
global Patm R nr tmax nt Xe To Xo Ru Tex1 hfg G Raire Ca Dtambor
Patm=101,3 %%Presión atmosférica KPa
R=7.8e-3%% Radio promedio de la pepa de cacao
nr=6%%numero de puntos en r
np=1%%tiene que ser menor a nr
tmax=86400% tiempo máximo
nt=1701 %% numero de puntos en el tiempo
Ru= 8.314 %% Constante universal de los gases
Raire=0.287 %%Constante del gas aire
To= 298 %% Temperatura Grados kelvin del producto
Tex1=50%% Temperatura del aire de secado
Ca=0.15%% Caudal de ingreso del aire m3/s
Qcfm=Ca*2118.88%%Caudal de ingreso en CFM
Dtambor=0.7; %%Diametro del tambor en metros
hfg=2412000%%J/Kg
Xo=1 %% Humedad del cacao inicial
%G=Ca*daire %% Flujo aire seco Kg/s
Xe=0.08 %% Humedad equilibrio
Kaire=0.02644;
Tex=Tex1+273.15;%%Tempeaura del aire de secado en grados Kelvin
Toc=Tex1 %% temperatura del aire de secado en grados centigrados
Tmedia=((To-273.15)+Tex1)/2;
uaire=0.00001729*((273+120)/(Tmedia+273+120))*(((Tmedia)+273)/273)^(3/2)
daire=Patm/(Raire*(Tmedia+273.15))
Vel=Ca/(pi()*Dtambor^2/4);
Reinold=Vel*daire*2*R/uaire
Nu=2+((0.552*Reinold^(0.53))*0.7261^(1/3));
ht= Nu*Kaire/(2*R) %% Coeficiente transferencia de calor
H=-0.0469*To^2-13.493*To+52202;
dr=R/(nr-1) %% diferencial de radio
r=0:dr:R;
dt=tmax/(nt-1) %% Diferencial de tiempo
t=0:dt:tmax;
X=zeros(nt,nr);%% Matriz de ceros de la humedad
X(1,1:nr)=Xo;
T=zeros (nt,nr);%% Matriz de ceros de Temperatura
T(1,1:nr)=To;
A=zeros(nr,nr);%%Matriz para calcular la humedad
C=zeros(nr,nr);%%Matriz para calcular la temperatura
b=zeros(nr,nt-1);%%Matriz para calcular la humedad
p=zeros(nr,nt-1);%%Matriz para calcular la temperatura
for j=1:nt-1;
    s=0;
    s10=0;
    for i=1:nr;
        s=s+(T(j,i));
        s10=s10+(X(j,i));
    end
    Ta=s/(nr);
    Xa1=s10/nr;
    K=2e-5*(Ta)^2-0.0111*Ta+2.14;
    cp=0.1569*(Ta)^2-102.51*Ta+18806;%%Calor específico del producto eJ
    J/Kg*K
```

```

def=12e-4*exp(-38000/(Ru*Ta));%% 1.3e-10*Xa1/Xo+4.18e-10
D=def*dt/dr^2;
f=def*dt/dr;
Sch=uaire/(def*d aire);
Sh=2+(0.552*Reinold^(0.53)*Sch^(1/3));
hm=def*Sh/(2*R);
B=hm*R/def;
    for i=2:nr-1;
A(1,1:2)=[-(1+3*D) 3*D];
A(i,i-1)=(D-f/r(i));
A(i,i)=-2*(D+1);
A(i,i+1)=(D+f/r(i));
A(i+1,i)=-D;
A(i+1,i+1)=(1+D+(D*B*dr)/R+(D*B*dr)/(i*R));
b(1,j)=(3*D-1)*X(j,1)-3*D*X(j,2);
b(i,j)=(f/r(i)-D)*X(j,i-1)+2*(D-1)*X(j,i)-(D+f/r(i))*X(j,i+1);
b(end,j)= D*X(j,i)+(1-D-(D*B*dr)/R-
(D*B*dr)/(i*R))*X(j,i+1)+2*((D*B*dr)/R+(D*B*dr)/(i*R))*Xe;
    end
    Z11=inv(A)*b;
    Z1=Z11.';
    X(2:j+1,1:i+1)=Z1(1:j,1:i+1);
    for j=1:nt-1;
        s2=0;
        for i=1:nr;
s2=s2+(X(j,i));
        end
        Xa=s2/nr;
d=698.89*Xa+698.89;
        for i=2:nr-1;
deft=K/(d*cp);
ft=deft*dt/dr;
DT=deft*dt/dr^2;
C(1,1:2)=[-(1+3*DT) 3*DT];
C(i,i-1)=(DT-ft/r(i));
C(i,i)=-2*(DT+1);
C(i,i+1)=(DT+ft/r(i));
C(end,end)=[1];
p(1,j)=(3*DT-1)*T(j,1)-3*DT*T(j,2);
p(i,j)=(ft/r(i)-DT)*T(j,i-1)+2*(DT-1)*T(j,i)-(DT+ft/r(i))*T(j,i+1);
p(end,j)= T(j,i+1)-((dr*ht)/K)*(T(j,i+1)-
Tex)+((2.37*Ta+3149)*1000*def*(662.38*X(j,i+1)+753.13)*(X(j+1,i+1)-
(X(j,i+1))))/K;
        end
        Z2=inv(C)*p;
        Z3=Z2.';
        T(2:j+1,1:i+1)=Z3(1:j,1:i+1);
    end
end
figure(1)
surf(T)
xlabel('distancia numero puntos')
ylabel('tiempo numero de puntos')
zlabel('Temperatura')
figure(2)
plot(t,T(1:nt,np),t,T(1:nt,2),t,T(1:nt,3))
legend('nodo 1','nodo 2','nodo 3')
ylabel('Tempratura Kelvin')
xlabel('Tiempo secado segundos')
%%figure(3)
%%plot(r,T(end,1:nr))

```

```
figure(4)
surf(X)
xlabel('distancia numero puntos')
ylabel('tiempo numero de puntos')
zlabel('humedad')
figure(5)
plot(t,X(1:nt,np),t,X(1:nt,2),t,X(1:nt,3),t,X(1:nt,4),t,X(1:nt,5),t,X(
1:nt,nr))
legend('nodo 1','nodo 2','nodo 3','nodo 4','nodo 5','nodo 6')
ylabel('Humedad em base seca')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(6)
plot(t,T(1:nt,np))
legend('nodo 1')
ylabel('Tempratura Kelvin')
```

## ANEXO C. Programación realizada en Matlab para el secado de cacao considerando la humedad del aire.

```
clc;
clear;
global R nr tmax nt Xe To Xo Tex1 Z HR msi Ca Dtambor np
%%Parametros de ingreso
Z=0 %% altura sobre el nivel del mar
HR=0.19 %% Porcentaje de humedad en el aire a la entrada del secador
R=7.8e-3%% Radio promedio de la pepa de cacao
nr=6%%numero de puntos en r
np=1%%tiene que ser menor a nr y mayor a cero
tmax=86400% tiempo maximo
nt=1701 %% numero de puntos en el tiempo
msi=19.5%%masa de cacao seco a obtener
To= 298 %% Temperatura Grados kelvin del producto
Tex1=48.8%% Temperatura del aire de secado
Ca=0.17%% Caudal de ingreso del aire m3/s
Dtambor=0.7; %%Diametro del tambor en metros
Xo=1 %% Humedad del cacao inicial
Xe=0.08 %% Humedad equilibrio
%%Formulas para desarrollar el cálculo
Ru= 8.314 %% Constante universal de los gases
Raire=0.287 %%Constante del gas aire
Qcfm=Ca*2118.88%%Caudal de ingreso en CFM
Cp=1.007 %% KJ/Kg calor especifico del aire
Kaire=0.02644;
Tex=Tex1+273.15;%%Tempeaura del aire de secado en grados Kelvin
Toc=Tex1 %% temperatura del aire de secado en grados centigrados
Pt=(101325*(1-0.00002255692*Z)^(5.2561));%%Presion atmosferica en
funcion de la altura
Patm=Pt/1000;
Tmedia=((To-273.15)+Tex1)/2;
uair=0.00001729*((273+120)/(Tmedia+273+120))*(((Tmedia)+273)/273)^(3/2)
%%viscosidad del aire
daire=Patm/(Raire*(Tmedia+273.15))
Vel=Ca/(pi()*Dtambor^2/4);
Reinold=Vel*daire*2*R/uair
Nu=2+((0.552*Reinold^(0.53))*0.7261^(1/3));
ht= Nu*Kaire/(2*R) %% Coeficiente transferencia de calor
C1=-5800.22061;
C2=1.3914993;
C3=-0.048640239;
C4=0.000041764768;
C5=-0.000000014452093;
C6=0;
C7=6.54596763;
G=Ca*daire %% Flujo aire seco Kg/s
hg=2501.6+1.795*Tex1 %%Entalpia de saturacion del agua
Pg=(exp(C1/Tex+C2+C3*Tex+C4*Tex^2+C5*Tex^3+C6*Tex^4+C7*log(Tex)))%%
Presion de saturacion del aire al 100% de humedad
Y=0.62198*(HR*Pg/(Pt-HR*Pg))%%Humedad absoluta
h=Cp*Tex1+hg*Y %%Entalpia del aire
hfgg1=-2.37*(To-273.15)+2501.6%%Entalpia de vaporizacion del agua
hg1=2501.6+1.795*(To-273.15) %%Entalpia del vapor saturado del agua
hs1=4.1813*(To-273.15)+0.2845
hg2=2501.6+1.795*Tex1 %%Entalpia del vapor saturado del agua
dr=R/(nr-1) %% diferencial de radio
```

```

r=0:dr:R;
dt=tmax/(nt-1) %% Diferencial de tiempo
t=0:dt:tmax;
X=zeros(nt,nr);%% Matriz de ceros de la humedad
X(1,1:nr)=Xo;
T=zeros (nt,nr);%% Matriz de ceros de Temperatura
T(1,1:nr)=To;
b=zeros(nr,nt-1);
p=zeros(nr,nt-1);
A=zeros(nr,nr);
C=zeros(nr,nr);
ma=zeros(nt,1);
mp=zeros(nt,1);
fa=zeros(nt-1,1);%% flujo masico de agua contenida en el cacao
fa(1,1)=0;
fal=zeros(nt-1,1);%% flujo masico de agua contenida en el cacao
fal(1,1)=0;
fp=zeros(nt-1,1);
fi=zeros(nt-1,1);%% flujo de cacao solido
Y1=zeros(nt,1);
Y1(1,1)=Y;
Y2=zeros(nt,1);
Y2(1,1)=Y;
Tp=zeros(nt-1,1);%%Temperatura del producto
Tp(1,1)=To-273.15;
Tg=zeros(nt-1,1);%% Temperatura del gas de secado
Tg(1,1)=Tex1;
Tg1=zeros(nt-1,1);%% Temperatura del gas de secado
Tg1(1,1)=Tex1;
TgK=zeros(nt-1,1);
TgK(1,1)=Tex;
TgK1=zeros(nt-1,1);
TgK1(1,1)=Tex;
Psat=zeros(nt-1,1);
Psat(1,1)=Pg;
HRg=zeros(nt-1,1);
HRg(1,1)=HR*100;
hfgg=zeros(nt,1);
hfgg(1,1)=hfgg1;
hg11=zeros(nt,1);
hg11(1,1)=hg1;
hg12=zeros(nt,1);
hg12(1,1)=hg2;
hs11=zeros(nt,1);
hs11(1,1)=hs1;
Q1=zeros(nt,1);
Q1(1,1)=0;
Q2=zeros(nt,1);
Q2(1,1)=0;
Q3=zeros(nt,1);
Q3(1,1)=0;
Q4=zeros(nt,1);
Q4(1,1)=0;
Q5=zeros(nt,1);
Q5(1,1)=0;
Qp=zeros(nt,1);
Qp(1,1)=0;

for j=1:nt-1;
    s=0;
    s10=0;

```

```

        for i=1:nr;
s=s+(T(j,i));
s10=s10+(X(j,i));
        end
Ta=s/(nr);
Xa1=s10/nr;
K=2e-5*(Ta)^2-0.0111*Ta+2.14;
cp=0.1569*(Ta)^2-102.51*Ta+18806;%%Calor especifico del producto
J/Kg*K
def=12e-4*exp(-38000/(Ru*Ta));%% 1.3e-10*Xa1/Xo+4.18e-10
D=def*dt/dr^2;
f=def*dt/dr;
Sch=uaire/(def*daire);
Sh=2+(0.552*Reinold^(0.53)*Sch^(1/3));
hm=def*Sh/(2*R);
B=hm*R/def;
        for i=2:nr-1;
A(1,1:2)=[-(1+3*D) 3*D];
A(i,i-1)=(D-f/r(i));
A(i,i)=-2*(D+1);
A(i,i+1)=(D+f/r(i));
A(i+1,i)=-D;
A(i+1,i+1)=(1+D+(D*B*dr)/R+(D*B*dr)/(i*R));
b(1,j)=(3*D-1)*X(j,1)-3*D*X(j,2);
b(i,j)=(f/r(i)-D)*X(j,i-1)+2*(D-1)*X(j,i)-(D+f/r(i))*X(j,i+1);
b(end,j)= D*X(j,i)+(1-D-(D*B*dr)/R-
(D*B*dr)/(i*R))*X(j,i+1)+2*((D*B*dr)/R+(D*B*dr)/(i*R))*Xe;
        end
        Z11=inv(A)*b;
Z1=Z11.';
X(2:j+1,1:i+1)=Z1(1:j,1:i+1);
        for j=1:nt-1;
s2=0;
        for i=1:nr;
s2=s2+(X(j,i));
        end
Xa=s2/nr;
d=698.89*Xa+698.89;
fa(j+1,1)=-((msi*(X(j+1,1)-X(j,1)))/dt);
Y1(j+1,1)=(fa(j+1,1)-fa(j,1))+Y1(j,1)*G/G;
Tg(j+1,1)=(h/Y1(j+1,1))-2500.9/(1.82+Cp/Y1(j+1,1));
TgK(j+1,1)=Tg(j+1,1)+273.15;
        for i=2:nr-1;
deft=K/(d*cp);
ft=deft*dt/dr;
DT=deft*dt/dr^2;
C(1,1:2)=[-(1+3*DT) 3*DT];
C(i,i-1)=(DT-ft/r(i));
C(i,i)=-2*(DT+1);
C(i,i+1)=(DT+ft/r(i));
C(end,end)=[1];
p(1,j)=(3*DT-1)*T(j,1)-3*DT*T(j,2);
p(i,j)=(ft/r(i)-DT)*T(j,i-1)+2*(DT-1)*T(j,i)-(DT+ft/r(i))*T(j,i+1);
p(end,j)= T(j,i+1)-((dr*ht)/K)*(T(j,i+1)-TgK(j,1))+((-
2.37*Ta+3149)*1000*def*(662.38*X(j,i+1)+753.13)*(X(j+1,i+1)-
(X(j,i+1))))/K;
        end
        Z2=inv(C)*p;
Z3=Z2.';
T(2:j+1,1:i+1)=Z3(1:j,1:i+1);
        end
end

```

```

end
vs=zeros(nt-1,1);
for j=1:nt-1;
    vs(j,1)=-(((X(j+1,np)-X(j,np))/dt));
end

for j=1:nt
    mp(j,1)=(1+X(j,np))*msi;
    ma(j,1)=(X(j,np))*msi;
end

fi(1,1)=0;
fp(1,1)=0;
for j=1:nt-1
    fa1(j+1,1)=-((msi*(X(j+1,np)-X(j,np))/dt);
    Y2(j+1,1)=((fa1(j+1,1)-fa1(j,1))+Y1(j,1)*G)/G;
    Tg1(j+1,1)=(h/Y2(j+1,1))-2501.6)/(1.795+Cp/Y2(j+1,1));
    TgK1(j+1,1)=Tg1(j+1,1)+273.15;
    fi(j+1,1)=msi/tmax;
    fp(j+1,1)=fa(j+1,1)+fi(j+1,1);
    Tp(j+1,1)=T(j+1,np)-273.15;

Psat(j+1,1)=(exp(C1/TgK1(j+1,1)+C2+C3*TgK1(j+1,1)+C4*TgK1(j+1,1)^2+C5*
TgK1(j+1,1)^3+C6*TgK1(j+1,1)^4+C7*log(TgK1(j+1,1)))));

HRg(j+1,1)=(Y2(j+1,1)*Pt/(0.62198*Psat(j+1,1)+Y2(j+1,1)*Psat(j+1,1)))*
100;
    hfgg(j+1,1)=-2.37*Tp(j+1,1)+2501.6;
    Q2(j+1,1)=fa1(j+1,1)*hfgg(j+1,1);
    Q5(j+1,1)=(fi(j+1,1)*(0.1569*(T(j,np))^2-
102.51*T(j,np)+18806)*(T(j+1,np)-T(j,np)))/1000;
    hg11(j+1,1)=2501.6+1.795*Tp(j+1,1);
    hg12(j+1,1)=2501.6+1.795*Tg1(j+1,1);
    hs11(j+1,1)=4.1813*Tp(j+1,1)+0.2845;
    Q1(j+1,1)=fi(j+1,1)*X(j+1,np)*(hs11(j+1,1)-hs11(j,1));
    %%Q3(j+1,1)=fi(j+1,1)*X(j+1,np)*(((0.1569*(T(j,np))^2-
102.51*T(j,np)+18806)*(T(j+1,np)))/1000-hs11(j+1,1));
    Q4(j+1,1)=fa1(j+1,1)*(-hg12(j+1,1)+hg11(j+1,1));
    Qp(j+1,1)=Q1(j+1,1)+Q2(j+1,1)+Q4(j+1,1)+Q5(j+1,1);
end
p1=0;
for k=1:nt
    p12=(Qp(k,1))^2;
    p1=p1+p12;
    rts=(p1/nt)^(1/2);
end
potencia=rts
figure(1)
surf(T)
xlabel('distancia numero puntos')
ylabel('tiempo numero de puntos')
zlabel('Temperatura')
figure(2)
plot(t,T(1:nt,1))
legend('nodo 1')
ylabel('Tempratura Kelvin')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(3)
surf(X)
xlabel('distancia numero puntos')
ylabel('tiempo numero de puntos')

```

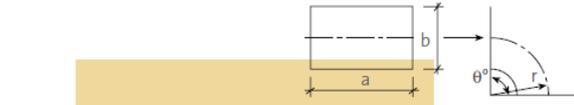
```

zlabel('humedad')
figure(4)
plot(t,X(1:nt,1),t,X(1:nt,2),t,X(1:nt,3),t,X(1:nt,4),t,X(1:nt,5),t,X(1:nt,nr))
legend('nodo 1','nodo 2','nodo 3','nodo 4','nodo 5','nodo 6')
ylabel('Humedad en base seca')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(5)
plot(X(1:nt-1,1),vs(1:nt-1,1))
ylabel('velocidad de secado')
xlabel('Humedad en base seca')
figure(6)
plot(t,Tg(1:nt,1))
ylabel('Temperatura del aire de secado')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(7)
plot(t,HRg(1:nt,1))
ylabel('Humedad relativa del aire de secado')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(8)
plot(t,Q2(1:nt,1))
ylabel('Flujo de calor para vaporizar el agua')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(9)
plot(t,Qp(1:nt,1))
ylabel('Flujo de calor total')
xlabel('Tiempo secado segundos')
figure(10)
subplot(2,2,1),plot(t,X(1:nt,np)),title('Humedad')
subplot(2,2,2),plot(t,T(1:nt,np)),title('Temperatura')
subplot(2,2,3),plot(t,HRg(1:nt,1)),title('Humedad relativa')
subplot(2,2,4),plot(t,Qp(1:nt,1)),title('Flujo de calor')
figure(11)
plot(t,X(1:nt,1))
legend('nodo 1')
ylabel('Humedad en base seca')
xlabel('Tiempo secado segundos')

```

## ANEXO D. Coeficientes para el cálculo de pérdida de carga (C).

### Codo con radio uniforme y sección rectangular



a) Codo a 90°

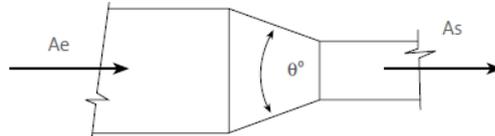
$$C = C' \cdot K_{Re}$$

siendo:

| Valores de C' |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a/b           | 0,25 | 0,5  | 0,75 | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 6,0  | 8,0  |
| r/b           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,5           | 1,3  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 0,98 | 0,92 | 0,89 | 0,85 | 0,83 |
| 0,75          | 0,57 | 0,52 | 0,48 | 0,44 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,42 | 0,43 | 0,44 |
| 1,0           | 0,27 | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,27 | 0,21 |
| 1,5           | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,17 |
| 2,0           | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,15 |

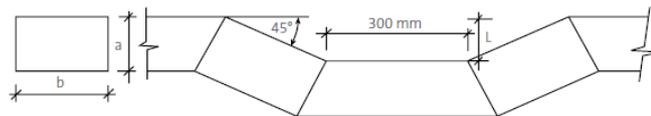
| Valores de K <sub>Re</sub> |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Re · 10 <sup>-4</sup>      | 1    | 2    | 3    | 4    | 6    | 8    | 10   | 14   | 20  |
| r/b                        |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
| 0,5                        | 1,40 | 1,26 | 1,19 | 1,14 | 1,09 | 1,06 | 1,04 | 1,0  | 1,0 |
| ≥0,75                      | 2,0  | 1,77 | 1,64 | 1,56 | 0,46 | 1,38 | 1,30 | 1,15 | 1,0 |

### Reducción y sección rectangular



| Valores de C |      |       |       |      |      |      |      |
|--------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| θ°           | 10   | 15-40 | 50-60 | 90   | 120  | 150  | 180  |
| Ae/As        |      |       |       |      |      |      |      |
| 2            | 0,05 | 0,05  | 0,06  | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,26 |
| 4            | 0,05 | 0,04  | 0,07  | 0,17 | 0,27 | 0,35 | 0,41 |
| 6            | 0,05 | 0,04  | 0,07  | 0,18 | 0,28 | 0,36 | 0,42 |
| 10           | 0,05 | 0,05  | 0,08  | 0,19 | 0,29 | 0,37 | 0,43 |

### Bordeo de obstáculo y sección rectangular

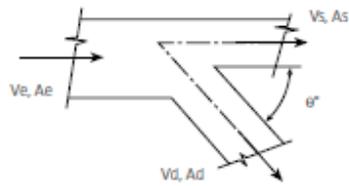


a/b = 0,5

L 1,5 a

| Valores de C |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|
| V (m/s)      | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   |
| C            | 0,18 | 0,22 | 0,24 | 0,25 | 0,26 |

### Derivación a bisel y conducto rectangular



Nota: sólo para  $15^\circ < \theta < 90^\circ$  y  $Ae = As + Ad$

$V_e, A_e$ : velocidad y área de entrada.

$V_s, A_s$ : velocidad y área de salida (principal).

$V_d, A_d$ : velocidad y área de la derivación.

| Valores de $C_d$ (en derivación) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| $V_d/V_e$                        | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0 |
| $\theta'$                        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
| 15                               | 0,81 | 0,65 | 0,51 | 0,38 | 0,28 | 0,20 | 0,11 | 0,06 | 0,14 | 0,30 | 0,51 | 0,76 | 1,0 |
| 30                               | 0,84 | 0,69 | 0,56 | 0,44 | 0,34 | 0,26 | 0,19 | 0,15 | 0,15 | 0,30 | 0,51 | 0,76 | 1,0 |
| 45                               | 0,87 | 0,74 | 0,63 | 0,54 | 0,45 | 0,38 | 0,29 | 0,24 | 0,23 | 0,30 | 0,51 | 0,76 | 1,0 |
| 60                               | 0,90 | 0,82 | 0,79 | 0,66 | 0,59 | 0,53 | 0,43 | 0,36 | 0,33 | 0,39 | 0,51 | 0,76 | 1,0 |
| 90                               | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0 |

| Valores de $C_s$ (en cond. principal) |           |       |       |      |      |      |            |
|---------------------------------------|-----------|-------|-------|------|------|------|------------|
| $\theta$                              |           | 15-60 |       |      | 90   |      |            |
| $V_s/V_e$                             | $A_s/A_e$ | 0-1,0 | 0-0,4 | 0,5  | 0,6  | 0,7  | $\geq 0,8$ |
| 0                                     |           | 1,0   | 1,0   | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0        |
| 0,1                                   |           | 0,81  | 0,81  | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81       |
| 0,2                                   |           | 0,64  | 0,64  | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64       |
| 0,3                                   |           | 0,50  | 0,50  | 0,52 | 0,52 | 0,50 | 0,50       |
| 0,4                                   |           | 0,36  | 0,36  | 0,40 | 0,38 | 0,37 | 0,36       |
| 0,5                                   |           | 0,25  | 0,25  | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,25       |
| 0,6                                   |           | 0,16  | 0,16  | 0,23 | 0,20 | 0,18 | 0,16       |
| 0,8                                   |           | 0,04  | 0,04  | 0,17 | 0,10 | 0,07 | 0,04       |
| 1,0                                   |           | 0     | 0     | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0          |
| 1,2                                   |           | 0,07  | 0,07  | 0,36 | 0,21 | 0,14 | 0,07       |
| 1,4                                   |           | 0,39  | 0,39  | 0,79 | 0,59 | 0,39 | —          |
| 1,6                                   |           | 0,90  | 0,90  | 1,4  | 1,2  | —    | —          |
| 1,8                                   |           | 1,8   | 1,8   | 2,4  | —    | —    | —          |
| 2,0                                   |           | 3,2   | 3,2   | 4,0  | —    | —    | —          |

| Diámetro interno del tubo de acero inox, cobre y material plástico |         | 8 - 16 mm   | 18 - 28 mm | 30 - 54 mm  | > 54 mm |
|--|---------|-------------|------------|-------------|---------|
| Diámetro exterior del tubo de acero                                |         | 3/8" - 1/2" | 3/4" - 1"  | 1 1/4" - 2" | > 2"    |
| Tipo de resistencia localizada                                     | Símbolo |             |            |             |         |
| Válvula de corte directo   |         | 10,0        | 8,0        | 7,0         | 6,0     |
| Válvula de corte inclinada   |         | 5,0         | 4,0        | 3,0         | 3,0     |
| Saracinesca de paso reducido                                       |         | 1,2         | 1,0        | 0,8         | 0,6     |
| Saracinesca de paso total  |         | 0,2         | 0,2        | 0,1         | 0,1     |
| Válvula de esfera paso reducido                                    |         | 1,6         | 1,0        | 0,8         | 0,6     |
| Válvula de esfera paso total                                       |         | 0,2         | 0,2        | 0,1         | 0,1     |
| Válvula de mariposa  |         | 3,5         | 2,0        | 1,5         | 1,0     |
| Válvula antirretorno   |         | 3,0         | 2,0        | 1,0         | 1,0     |
| Válvula para emisor térmico directa                                |         | 8,5         | 7,0        | 6,0         | —       |
| Válvula para emisor térmico en escuadra                            |         | 4,0         | 4,0        | 3,0         | —       |
| Detentor directo   |         | 1,5         | 1,5        | 1,0         | —       |
| Detentor en escuadra   |         | 1,0         | 1,0        | 0,5         | —       |
| Válvula de cuatro vías   |         | 6,0         |            | 4,0         |         |
| Válvula de tre vías  |         | 10,0        |            | 8,0         |         |
| Paso a través de radiador  |         | 3,0         |            |             |         |

## ANEXO E. Especificaciones ventilador centrífugo.

### Centrifugal fans

| Technical data   |             |       |           |            |                     |                     |                     |         |                  |
|------------------|-------------|-------|-----------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|------------------|
|                  | U [V]       | P [W] | I [A]     | SCr        | t <sub>m</sub> [°C] | t <sub>u</sub> [°C] | t <sub>o</sub> [°C] | n [rpm] | Lpa @ 3m [dB(A)] |
| DA 7-7 4P 300    | 1 x 230     | 300   | 2         | BTRN-1-2   | 60                  | 60                  | -20                 | 1370    | 56.5             |
| DA 9-9 4P 300    | 1 x 230     | 300   | 2.8       | BTRN-1-3   | 40                  | 40                  | -20                 | 1277    | 58.5             |
| DA 9-9 4P 420    | 1 x 230     | 420   | 3.1       | BTRN-1-3   | 40                  | 40                  | -20                 | 1372    | 59.5             |
| DA 10-10 6P 245  | 1 x 230     | 245   | 2.78      | BTRN-1-3   | 40                  | 40                  | -20                 | 905     | 55.5             |
| DA 10-10 55      | 1 x 230     | 550   | 4.8       | BTRN-1-5   | 40                  | 40                  | -20                 | 1470    | 64               |
| DA 12-9 6P 515   | 1 x 230     | 515   | 4.1       | BTRN-1-5   | 40                  | 40                  | -20                 | 935     | 56.5             |
| DA 12-12 6P 515  | 1 x 230     | 515   | 4.2       | BTRN-1-5   | 40                  | 40                  | -20                 | 1437    | 58.5             |
| DA 12-12 6PT 550 | 3 x 230/400 | 550   | 5.9 / 3.4 | BTRNTK-4-4 | 40                  | 40                  | -20                 | 936     | 59.5             |

SC<sub>T</sub> = transformer controller

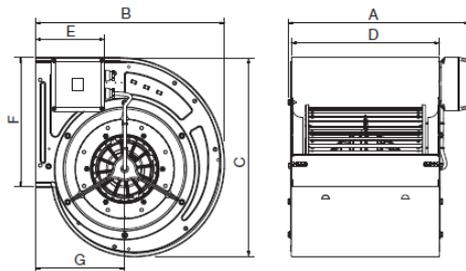
\* **BTRN-4-4 for 3 x 400V**

t<sub>m</sub> = maximum air temperature

t<sub>u</sub> = maximum ambient temperature

t<sub>o</sub> = minimum operating temperature

Lpa = Sound pressure level



Link: <https://www.cairox.be/EN/documentation/I04.005.D-DA-ERP-2015-Centrifugal-fans>

## ANEXO F. Especificaciones ventilador centrífugo de media presión.

# CRL

Ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración con turbina con álabes hacia atrás



#### Ventilador:

- Envoltorio en chapa de acero
- Turbina con álabes a reacción, en chapa de acero
- Temperatura máxima del aire a transportar: -25°C + 120°C

#### Motor:

- Motores de eficiencia IE3 para potencias iguales o superiores a 0,75kW, excepto monofásicos, 2 velocidades y 8 polos.
- Motores clase F, con rodamientos a bolas, protección IP55.
- Trifásicos 230/400V-50Hz

#### Acabado:

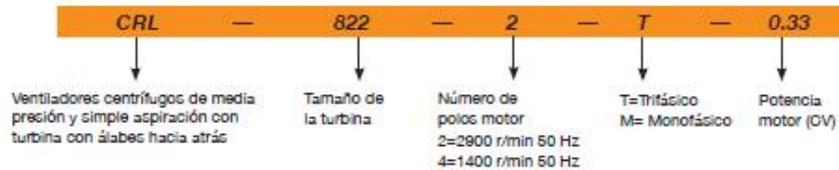
- Anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 180 °C, previo desengrase con tratamiento nanotecnológico libre de fosfatos.

#### Bajo demanda:

- Modelos a 60 Hz
- Bobinados especiales para diferentes tensiones
- Ventilador preparado para transportar aire hasta 250°C
- Ventilador en acero inoxidable



### Código de pedido



### Características técnicas

| Modelo              | Velocidad<br>(r/min) | Intensidad máxima admisible (A) |      | Potencia instalada<br>(kW) | Caudal máximo<br>(m³/h) | Nivel presión sonora<br>dB(A) <sup>m</sup> | Peso aprox.<br>(Kg) | According ErP |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|------|----------------------------|-------------------------|--|---------------------|---------------|
|                     |                      | 230V                            | 400V |                            |                         |  |                     |               |
| CRL-822-2T-0.33     | 2760                 | 1,24                            | 0,71 | 0,25                       | 1350                    | 72   | 19                  | 2015          |
| CRL-925-2T-0.5      | 2830                 | 1,56                            | 0,90 | 0,37                       | 1850                    | 75   | 22                  | 2015          |
| CRL-1028-2T-0.75    | 2780                 | 2,17                            | 1,25 | 0,55                       | 2600                    | 77   | 29                  | 2015          |
| CRL-1031-2T-1.5 IE3 | 2830                 | 4,03                            | 2,32 | 1,10                       | 3600                    | 82   | 41                  | 2015          |
| CRL-1135-2T-3 IE3   | 2870                 | 7,70                            | 4,43 | 2,20                       | 5230                    | 71   | 59                  | 2015          |
| CRL-1240-2T-4 IE3   | 2910                 | 10,00                           | 5,77 | 3,00                       | 7320                    | 90   | 85                  | 2015          |
| CRL-1240-4T-1 IE3   | 1420                 | 2,82                            | 1,62 | 0,75                       | 3630                    | 74   | 66                  | 2015          |
| CRL-1445-4T-1.5 IE3 | 1455                 | 4,07                            | 2,34 | 1,10                       | 6170                    | 78   | 83                  | 2015          |
| CRL-1650-4T-2 IE3   | 1450                 | 5,48                            | 3,15 | 1,50                       | 8500                    | 81   | 106                 | 2015          |

Link: [https://www.sodeca.com/upload/imgNews/FO38\\_CRL\\_ES.pdf](https://www.sodeca.com/upload/imgNews/FO38_CRL_ES.pdf)

## ANEXO G. Especificaciones Controlador Maxwell TH900

### Controlador de temperatura PID

| Modelo                      | TC4S  | TC4SP   | TC4Y   | TC4M  | TC4H  | TC4W  | TC4L  |
|-----------------------------|---|---|--|---|---|---|---|
| Apariencias y Dimensiones   |  [W48★H48★L65mm] |  [W48★H48★L72mm] |  [W72★H36★L77mm]  |  [W72★H72★L65mm] |  [W48★H96★L65mm] |  [W96★H48★L65mm] |  [W96★H96★L65mm] |
| Alimentación                | 100-240VCA 50/60Hz  |   |  |   |   |   |   |
| Rango de voltaje disponible | 90~110% del rango de voltaje  |   |  |   |   |   |   |
| Consumo de Alimentación     | Max. 5VA  |   |  |   |   |   |   |
| Método de display           | Display LED de 7 Segmentos(Rojo), Otro display(LED Verde, Amarillo, Rojo)                         |   |  |   |   |   |   |
| Dimensiones de caracter     | W7★H15mm  |   | W7.4★H15mm   | W9.5★H20mm  | W7★H14.6mm  | W9.5★H20mm  | W11★H22mm   |
| Tipo de entrada             | RTD   | DIN Pt100Ω(Tolerancia max. de resistencia 5Ω por cable)   |  |   |   |   |   |
|                             | TC  | K(CA), J(IC)  |  |   |   |   |   |
| Método de display           | TC, RTD   | (★1)<br>(★2)  | (PV ±0.5% ó ±1°C mayor) rdg ±1Dígito<br>※TC4SP (Tipo enchufe) es (PV ±0.5% ó ±2°C mayor) rdg ±1Dígito<br>Basado en temperatura normal(23°C ±5°C) |   |   |   |   |
| Salida de control           | Relelador   | 250VCA 3A 1a  |  |   |   |   |   |
|                             | SSRP  | 12VCC± 2V 20mA Max.   |  |   |   |   |   |
| Salida auxiliar             | Salida a relevador AL1, AL2 : 250VCA 1A 1a(※TC4SP, TC4Y solo tiene AL1.)                          |   |  |   |   |   |   |
| Tipo de control             | ON/OFF P PI PD  |   |  |   |   |   |   |

Link: <http://www.alefindustrial.com/AUTONICS/controlador%20de%20temperatura.pdf>

## Medidores de humedad de granos



### Medidor de humedad de granos de café y cacao WILE COFFEE

Modelo: **WILE COFFEE**

El medidor de humedad Wile coffee mide la humedad en café pergamino, humedad en café verde, humedad en café tostado y humedad en granos de cacao. El Wile 55 Coffee presenta una fiabilidad ampliamente demostrada. Los medidores de humedad Wile son una herramienta básica para agricultores, almacenistas y comerciantes de café y/o cacao.

Use el medidor de humedad de granos Wile Coffe cuando necesite información rápida y confiable sobre el contenido de humedad en granos de café y cacao.

Link: <https://www.valiometro.pe/medidor-de-humedad-de-granos-de-cafe-y-cacao-wile-coffee>

ANEXO I. Proforma y especificaciones de una secadora de cacao industrial.

Sr. Carlos Alfredo Zhigu Loja  
Teléfono: 0999230779  
E-mail: caz\_dx@hotmail.com  
Machala.-

PROFORMA

POR LO SIGUIENTE

DEBE

Una **SECADORA SIRCA Mod. SR-10-SI para CACAO.**

Capacidad: 10 qq./parada (grano húmedo). **A la semana puede hacer de 3 a 5 paradas de secado.**  
Tiempos: Esta secadora baja **2 grados de humedad por hora.**

Incluye:

Soplador de aire marca SIRCA.

Sistema de ventilación accionado por un motor eléctrico de 2 HP. 220 v. Monofásico.

Boca de transición de secador a mesa.

Quemador de Gas GLP marca SIRCA.

Consumo de Gas GLP: 3 kilos/hora. Consumo de energía eléctrica: 1,5 KW/hora.

Controles para encendido de Quemador, Presión y Temperatura.

Una **MESA METALICA para secado del producto**, de 1,5 mts. x 2 mts.

Estructura metálica, construida de tubo galvanizado y varilla corrugada.

Plancha perforada de 1.5 mm. de espesor y 5 mm. de diámetro de perforación.

Un **CERRAMIENTO METÁLICO** para la mesa, de 7 m. lineales x 1 mt. de alto.

Construido de estructura de tubo cuadrado, y plancha galvanizada de 1/16" de espesor.

**PRECIO TOTAL ..... \$ 2.500,00 + IVA**

Observaciones:

- *Bajo consumo energético (energía eléctrica y Combustible).*
- *No contamina el producto al secar.*
- *Garantía SIRCA: 1 Año*
- *Forma de Pago: 60% a la orden de compra, 40% a la entrega de la Secadora en taller SIRCA.*
- *No se incluye transporte. Entrega del equipo en Fábrica SIRCA – Guayaquil.*
- *Validez de la pro forma: 15 días.*

Att.

  
ING. JORGE RUIZ  
GERENTE COMERCIAL



Link: <https://sircaecuador.com/productos/secadora-a-gas-pequenas-y-medianas-capacidades/>

## ANEXO J. Especificaciones del material aislante

- 
 Aislante térmico, acústico e ignífugo elaborado mediante un proceso de fibración en el que se mezcla arena, vidrio reciclado y diversos aditivos, que son fundidos en un horno. Allí se produce la unión de millones de filamentos de vidrio que conforman la Lana de Vidrio.
- 
 Presentación: comprimida en rollos con aluminio.

|                                 | NORMA      | ROLLOS                |
|---------------------------------|------------|-----------------------|
| Largo (m)                       |            | 18                    |
| Ancho (m)                       |            | 1,2                   |
| Espesor (mm)                    |            | 38 / 50               |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )   |            | 12                    |
| Conductividad térmica (W/(m·K)) |            | 0,042                 |
| Temperatura                     | ASTM C411  | h. 233°C              |
| Absorción de la humedad         | ASTM C1104 | < 1.0% a 49°C, 95% RH |
| Corrosividad                    | ASTM C665  | No acelera            |
| Resistencia al moho             | ASTM C665  | No se enmohece        |



|   | NORMA                        | ROLLOS                          |      |
|---|------------------------------|---------------------------------|------|
| Características de la superficie encendida<br>Prueba de fuego | ASTM E84                     | Expansión de la llama           | < 25 |
|   |                              | Desarrollo de humo              | < 50 |
|   |                              | Clase                           | 0    |
|   |                              | Índice de inflamabilidad        | 0    |
|   | BS 476 Parte 6, 7            | Índice de expansión de la llama | 0    |
| AS 1530-3   | Calor desprendido            | 0                               |      |
|   | Índice de desarrollo de humo | 1                               |      |

Link: [https://grupo-ap.com.ar/wp-content/uploads/2016/12/Lana-de-Vidrio\\_Ficha-T%C3%A9cnica.pdf](https://grupo-ap.com.ar/wp-content/uploads/2016/12/Lana-de-Vidrio_Ficha-T%C3%A9cnica.pdf)





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE  
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 22 / 07 / 2021

|  |
|--|
| <b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>   |
| <b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Carlos Alfredo Zhigui Loja</i>                      |
| <b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>   |
| <i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>                                  |
| <b>Título a optar:</b> <i>Magíster en Diseño Mecánico</i>                          |
| <b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i> |

**LUIS  
ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**

Firmado digitalmente por  
LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,  
serialNumber=0602766974,  
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS  
VARGAS  
Fecha: 2021.07.22 16:37:18  
-05'00'



0058-DBRAI-UPT-IPEC-2021

Mensaje nuevo

Responder | Eliminar | Archivo | No deseado | Limpiar | Mover a

**Carpetas**

- Bandeja de entr... 4148
- Correo no deseado 24
- Borradores
- Elementos enviados
- Elementos elimin... 118
- Archivo
- Notas
- Conversation History
- SRI

Actualizar a Microsoft 365 con Características de Outlook Premium

**RE: Traducción resumen de Tesis IPEC**

Respondió el Mar 1/6/2021 23:08.

JAZMINA IVONNE MENA MAYORGA <jazmina.mena@espoch.edu.ec>  
u.ec>  
Mar 1/6/2021 10:23  
Para: Usted  
CC: Centro de Idiomas

ABSTRACT\_01\_06\_2021...  
14 KB

Buenos días,

Adjunto traducción solicitada.

Saludos cordiales,

Jazmin Mena  
*"Educating the mind without educating the heart, is no education at all" Aristotle*

De: Centro de Idiomas <idiomas@espoch.edu.ec>

Activar Windows