



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DESHIDRATADOR DE
ALIMENTOS GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA

TESIS

PARA OBTENER GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

Pérez González Eduardo

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, México D.F., Junio de 2014

JURADO ASIGNADO

Presidente: Ing. Leonardo Rodrigo de Bengoechea Olguin

Vocal: M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

Secretario: Dr. Rogelio Soto Ayala

1er Suplente: M.I. Jose Esteban Barrios Bonilla

2do Suplente: Dr. Martín Salinas Vázquez

TUTOR DE TESIS

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

INTRODUCCIÓN.

México debe su gran diversidad de frutas, hortalizas y semillas a su privilegiada posición geográfica en el mundo. Si juntáramos todas las frutas y verduras producidas en México, las naranjas serían lo más abundante de nuestra cosecha, sumando casi 3.67 millones de toneladas, seguida del jitomate con 2.84 millones de toneladas y el chile verde en tercer lugar con 2.38 millones de toneladas.

El problema originado por la bonanza en producción de los productos hortofrutícolas son la enorme cantidad de productos desperdiciado al año, al no lograr colocarlos en el mercado por su baja demanda.

Sin duda resulta controversial que México siendo un país en el que más de la mitad de la población vive en situación de pobreza, se desperdicien más de una tercera parte de los alimentos que se producen cada año.

En el ámbito energético nuestro país también cuenta con una enorme riqueza en fuentes de energía geotérmica de baja entalpía. Este recurso puede tener una gran diversidad de aplicaciones como uso directo, pero en nuestro país solo se emplea con fines recreativos, como la balneología.

Con la finalidad de reducir la merma productiva de frutas y verduras y fomentar los usos directos de la geotermia, se propone deshidratar los excedentes de producción. De esta manera su vida de anaquel es prolongada, se le da un valor agregado al producto, abriendo nuevos mercados.

A partir de un prototipo experimental de un deshidratador, desarrollado por el grupo de Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica (IMPULSA) ahora conocido como Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas (IIDEA), se propone el siguiente diseño, con una mayor capacidad y mejores condiciones operativas.

Por otro lado el reto está en hacer de este proyecto, uno autosustentable y autosostenible. Para lograr esta meta, se ha pensado en su funcionamiento con energía geotérmica, que en caso de ser necesario puede acoplarse a un sistema de calefacción solar.

OBJETIVOS

General:

Realizar el diseño de un deshidratador de alimentos geotérmico, para ser probado en campo en el estado de Mexicali, Baja California, deshidratando jitomates principalmente.

Particulares:

- Mostrar las diversas aplicaciones que se le pueden dar al recurso geotérmico de baja entalpía, así como el panorama de estas aplicaciones en nuestro país.
- Exponer la importancia que ha tenido el deshidratado a lo largo de la historia y cómo pese a ser una técnica de conservación milenaria, sigue estando presente en nuestros días, pero ahora enfrentándose a nuevos retos, ambientales, de volumen de procesamiento y calidad.
- Realizar el análisis de la dinámica de secado, balances de masa y energía, para rediseñar un secador de alimentos, que satisfaga las necesidades operativas requeridas para el secado de jitomate en el estado de Mexicali, Baja California.
- Por medio del CAD (Computer Aided Design) generar los planos de todos los elementos que conforman el sistema deshidratador de alimentos, para su futura manufactura.

ÍNDICE

| | |
|--|---------------|
| CAPÍTULO 1 ENERGÍA GEOTÉRMICA..... | - 18 - |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | - 18 - |
| 1.2 GEOTERMIA | - 18 - |
| 1.3 HISTORIA | - 20 - |
| 1.4 GEOTERMIA EN EL MUNDO | - 23 - |
| 1.5 RECURSOS GEOTÉRMICOS..... | - 26 - |
| 1.5.1 SISTEMAS HIDROTERMALES | - 26 - |
| 1.5.2 SISTEMA DE ROCA SECA CALIENTE | - 27 - |
| 1.5.3 SISTEMAS MARINOS..... | - 29 - |
| 1.5.4 SISTEMAS MAGMÁTICOS | - 30 - |
| 1.5.5 SISTEMA GEOPRESURIZADO | - 31 - |
| 1.6 USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA..... | - 32 - |
| 1.6.1 SECTOR RESIDENCIAL Y SERVICIOS | - 34 - |
| 1.6.2 PROCESOS INDUSTRIALES | - 36 - |
| 1.6.3 ACUICULTURA..... | - 36 - |
| 1.6.4 INVERNADEROS Y ESTERILIZACIÓN DE SUELOS | - 37 - |
| 1.6.5 DESHIDRATADO DE ALIMENTOS | - 40 - |
| 1.7 MÉXICO Y SU POTENCIAL GEOTÉRMICO | - 42 - |
| 1.8 ASPECTOS AMBIENTALES..... | - 44 - |
| 1.9 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS | - 45 - |
| 1.10 CONCLUSIONES | - 46 - |
| CAPÍTULO 2 DESHIDRATADORES..... | - 47 - |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | - 47 - |
| 2.2 HISTORIA | - 47 - |
| 2.3 SECADORES UTILIZADOS EN LAS INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS..... | - 50 - |
| 2.3.1 SECADORES SOLARES DIRECTOS O POR CONVECCIÓN NATURAL..... | - 51 - |
| 2.3.2 SECADORES SOLARES INDIRECTOS..... | - 52 - |
| 2.3.3 SECADORES SOLARES MIXTOS..... | - 53 - |
| 2.3.4 SECADORES SOLARES HÍBRIDOS | - 53 - |
| 2.4 PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN..... | - 54 - |
| 2.5 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA DESHIDRATACIÓN | - 55 - |
| 2.5.1 AIRE | - 55 - |
| 2.5.1.1 Composición..... | - 56 - |
| 2.5.1.2 Calor específico | - 56 - |
| 2.5.1.3 Peso específico..... | - 57 - |
| 2.5.1.4 Volumen específico | - 58 - |
| 2.5.1.5 Entalpía del aire atmosférico. | - 58 - |
| 2.6 HUMEDAD ABSOLUTA Y HUMEDAD RELATIVA..... | - 59 - |
| 2.7 TEMPERATURA DE ROCIO..... | - 59 - |
| 2.8 ACTIVIDAD DE AGUA | - 60 - |

| | |
|--|----------------|
| 2.9 AGUA LIGADA | - 61 - |
| 2.10 PRESIÓN DE VAPOR | - 62 - |
| 2.11 HUMEDAD EN EQUILIBRIO DINÁMICO | - 64 - |
| 2.12 HUMEDAD DEL ALIMENTO | - 65 - |
| 2.12.1 HUMEDAD BASE HÚMEDA | - 65 - |
| 2.12.2 HUMEDAD BASE SECA..... | - 65 - |
| 2.12.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA | - 66 - |
| 2.13 PROCESOS PSICOMÉTRICOS | - 68 - |
| 2.13.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO Y BULBO HÚMEDO | - 68 - |
| 2.13.2 LEYES PSICROMÉTRICAS | - 69 - |
| 2.13.3 CARTA PSICROMÉTRICA..... | - 70 - |
| 2.14 ISOTERMAS DE SORCIÓN | - 71 - |
| 2.15 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA | - 74 - |
| 2.15.1 TRANSFERENCIA DE CALOR | - 74 - |
| 2.15.2 TRANSFERENCIA DE MASA | - 75 - |
| 2.15.3 BALANCE DE ENERGÍA..... | - 76 - |
| 2.16 PRIMERA CURVA DE SECADO | - 77 - |
| 2.17 SEGUNDA CURVA DE SECADO | - 78 - |
| 2.18 VELOCIDAD DE SECADO | - 80 - |
| 2.19 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE SECADO | - 81 - |
| 2.20 TIEMPO DE DESHIDRATADO | - 81 - |
| 2.21 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SECADO..... | - 83 - |
| 2.22 CONCLUSIONES | - 84 - |
| CAPÍTULO 3 PROPUESTA DE DISEÑO DESHIDRATADOR IIDEA | - 85 - |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | - 85 - |
| 3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO..... | - 85 - |
| 3.3 PROPUESTA DE DISEÑO | - 86 - |
| 3.3.1 RECONOCIMIENTO DE LA NECESIDAD | - 86 - |
| 3.3.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | - 87 - |
| 3.3.3 SÍNTESIS | - 87 - |
| 3.3.4 ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN | - 88 - |
| 3.3.4.1 Diagrama general del proceso..... | - 88 - |
| 3.3.4.2 Conceptualización del diseño..... | - 90 - |
| 3.3.5 BASES DE DISEÑO | - 92 - |
| 3.3.5.1 Cálculos para el diseño del intercambiador de calor | - 93 - |
| 3.3.5.2 Condiciones operativas | - 93 - |
| 3.3.5.3 Balance de energía y masa para el diseño del intercambiador de calor | - 94 - |
| 3.3.5.4 Diseño del intercambiador de calor | - 95 - |
| 3.3.6 EVALUACIÓN | - 100 - |
| 3.3.6.1 Curva de secado del Jitomate | - 100 - |
| 3.4 CONCLUSIONES | - 104 - |
| CAPÍTULO 4 CAD Y PLANOS..... | - 105 - |
| 4.1 INTRODUCCIÓN | - 105 - |
| 4.2 PRESENTACIÓN..... | - 105 - |

| | |
|---|----------------|
| 4.2.1 ACCESORIOS..... | - 107 - |
| 4.2.1.1 <i>Cambiador de calor para la calefacción de aire</i> | - 107 - |
| 4.2.1.2 <i>Espiguero</i> | - 109 - |
| 4.2.1.3 <i>Campana de extracción</i> | - 110 - |
| 4.3 PLANOS..... | - 111 - |
| 4.4 CONCLUSIONES | - 116 - |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES | - 118 - |
| 5.1 CONCLUSIONES GENERALES..... | - 118 - |
| CAPÍTULO 6 SECCIÓN DE APÉNDICES | - 120 - |
| 6.1 APÉNDICE A MEMORIA DE CÁLCULO | - 120 - |
| 6.1.1 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA | - 120 - |
| 6.1.2 VELOCIDAD EN LA TUBERÍA | - 121 - |
| 6.1.3 ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR REQUERIDA | - 121 - |
| 6.1.3.1 <i>Diferencia de temperaturas media logarítmica</i> | - 122 - |
| 6.1.3.2 <i>Coefficiente global de transferencia de calor</i> | - 123 - |
| 6.1.3.2.1 <i>Coefficiente convectivo para el agua (flujo interno en tuberías)</i> | - 123 - |
| 6.1.3.2.2 <i>Coefficiente convectivo para el aire (flujo externo en tubería)</i> | - 124 - |
| 6.1.4 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE CARGA..... | - 127 - |
| 6.1.5 DATOS GEOMÉTRICOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR | - 127 - |
| BIBLIOGRAFÍA..... | - 130 - |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|--------|
| FIG. 1.1.- ACANTILADO DE MÁS DE 200 M DE ALTURA CON MANIFESTACIONES DE AGUAS TERMALES EN PAMUKKALE, TURQUÍA (TRILLO). | - 19 - |
| FIG. 1.2.- MINA ARTESANAL DE AZUFRE DEL VOLCÁN INDONESIO IJEN (CRUZ, 2010). | - 21 - |
| FIG. 1.3.- INDUSTRIA QUÍMICA PARA EXTRAER EL ÁCIDO BÓRICO DE LAS AGUAS CALIENTES QUE EMERGÍAN NATURALMENTE (GEOTHERMALENERGY). | - 22 - |
| FIG. 1.4.- FUENTE EN LA FRONTERA SUR DE FRANCIA, AUVERNIA, CON AGUA DE 82 °C (ADEME Y BRGM). | - 22 - |
| FIG. 1.5.- PRODUCCIÓN DE CALOR POR PAÍS (POTENCIA INSTALADA EN 2000) (ADEME Y BRGM). | - 24 - |
| FIG. 1.6.- PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GEOTERMIA (POTENCIA INSTALADA EN 2000) (ADEME Y BRGM). | - 24 - |
| FIG. 1.7.- SISTEMA HIDROTHERMAL (TRILLO). | - 26 - |
| FIG. 1.8.- ROCA SECA CALIENTE (TRILLO). | - 28 - |
| FIG. 1.9.- GEOFÍSICA. VENTILA HIDROTHERMAL [FOTO UNAM]. | - 29 - |
| FIG. 1.10 POZO DE KRAFIA AL NOROESTE DE ISLANDIA (RT SEPA MÁS, 2014). | - 30 - |
| FIG. 1.11.- VOLCÁN A UN COSTADO DEL LAGO MÝVATN EN LA CIUDAD DE AKUREYI, EN LA PARTE NORTE DE ISLANDIA (SER TURISTA, 2014). | - 31 - |
| FIG. 1.12.- PLANTA DE DEMOSTRACIÓN EN TEXAS (GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, 2013). | - 32 - |
| FIG. 1.13.- PRINCIPALES USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA COMO UNA FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA (TRILLO). | - 33 - |
| FIG. 1.14.- ESQUEMA DE UNA BOMBA DE CALOR EN CALEFACCIÓN (GEO-HEAT CENTER, 2012). | - 35 - |
| FIG. 1.15.- USO GEOTÉRMICO EN PLANTA CEMENTERA, ALEMANIA (IDAE; IGME, 2008). | - 36 - |
| FIG. 1.16.- PISCIFACTORÍA EL ALBA EN SOBRESCOBIO, ESPAÑA (LA CUENCA DEL NALÓN). | - 37 - |
| FIG. 1.17.- CURVA DE CRECIMIENTO DE ALGUNAS COSECHAS (GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, 2013). | - 38 - |
| FIG. 1.18.- INVERNADEROS A) DUCTO DE CALEFACCIÓN AÉREO; B) CALEFACCIÓN DE BANCOS; C) DUCTOS DE CALEFACCIÓN BAJOS PARA CALEFACCIÓN DE AIRE; D) CALEFACCIÓN DE SUELO; E) POSICIÓN LATERAL; F) VENTILADOR AÉREO; G) DUCTOS ALTOS; H) DUCTOS BAJOS (GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, 2013). | - 39 - |
| FIG. 1.19.- EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO O PRODUCCIÓN DE ANIMALES COMESTIBLES (GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, 2013). | - 40 - |
| FIG. 1.20.- INTERCAMBIADORES DE CALOR EN LA ESTUFA DE SECADO DE MADERA Y TUBERÍA DE CALEFACCIÓN GEOTÉRMICA EN LOS AZUFRES MICHOACÁN (ALEJANDRO, 2009). | - 41 - |
| FIG. 1.21.- DESHIDRATADOR DE FRUTAS Y TANQUE DE AGUA CALIENTE EN LOS AZUFRES (ALEJANDRO, 2009). | - 41 - |
| FIG. 1.22.- MAPA DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN MÉXICO (INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS, 2010). | - 43 - |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|--------|
| FIG. 2.1.- CULTIVO DE SPIRULINA POR LOS MEXICANOS (DIBUJO DE PETER T. FURST; MARCH 1978). | - 49 - |
| FIG. 2.2.- EXTENDIDO DE CAFÉ PARA SU SECADO O TOSTADO NATURAL (ALTAMIRACAFE.BLOGSPOT.MX, 2013). | - 50 - |
| FIG. 2.3.- SECADOR SOLAR DIRECTO (FINCK-PASTRANA, 2013). | - 51 - |
| FIG. 2.4.- DESHIDRATADORES DIRECTOS EN EL IER (EL AUTOR, 2013). | - 52 - |
| FIG. 2.5.- SECADOR SOLAR INDIRECTO (FINCK-PASTRANA, 2013). | - 52 - |
| FIG. 2.6.- SECADOR DE CALENTAMIENTO MIXTO (FINCK-PASTRANA, 2013). | - 53 - |

| | |
|--|--------|
| FIG. 2.7.- SECADOR DE BANDEJAS QUE TRABAJA CON ENERGÍA SOLAR EN EL IER TEMIXCO 2013 [IER]. | - 54 - |
| FIG. 2.8.- EL AGUA CONTENIDA EN EL AIRE ALREDEDOR DEL VASO SE CONDENSA AL ENFRIARSE LO SUFICIENTE HASTA ALCANZAR SU TEMPERATURA DE ROCÍO. | - 59 - |
| FIG. 2.9.- ACTIVIDAD DE AGUA VS VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN RELATIVA (LAGUNAS, 2013). | - 61 - |
| FIG. 2.10.- AGUA TOTAL, LIBRE Y LIGADA (AVIBERT.BLOGSPOT.COM). | - 62 - |
| FIG. 2.11.- EL NÚMERO DE MOLÉCULAS QUE SALEN DEL LÍQUIDO POR EVAPORACIÓN ES IGUAL AL NÚMERO DE MOLÉCULAS QUE ENTRAN POR CONDENSACIÓN (FIGUEROA, 2013). | - 63 - |
| FIG. 2.12.- LA NATURALEZA BUSCA EQUILIBRAR LAS PRESIONES DE VAPOR DEL ALIMENTO Y EL MEDIO; $Aw = 0.6$ (LAGUNAS, 2013). | - 64 - |
| FIG. 2.13.- PSICRÓMETRO (FIGUEROA, 2013). | - 69 - |
| FIG. 2.14.- ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE CARRIER, TAMBIÉN CONOCIDO COMO CARTA PSICROMÉTRICA (PÉREZ., 2007). | - 71 - |
| FIG. 2.15.- CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS SEGÚN LA IUPAC (CORTÉS, 2013). | - 72 - |
| FIG. 2.16.- CURVAS ISOTÉRMICAS PARA PAPAS (EL AUTOR). | - 73 - |
| FIG. 2.17.- EL SEGMENTO AB REPRESENTA EL PERÍODO DE ESTADO NO ESTACIONARIO O CALENTAMIENTO INICIAL, EL SEGMENTO BD REPRESENTA EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE, EL SEGMENTO DE REPRESENTA EL PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE (VIDAÑA, 2013). | - 78 - |
| FIG. 2.18.- VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD DEL ALIMENTO; MC ES EL CONTENIDO DE HUMEDAD CRÍTICO; ME ES EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO (VIDAÑA, 2013). | - 79 - |
| FIG. 2.19.- COLAPSO DE LA ESTRUCTURA CAPILAR CELULAR (VIDAÑA, 2013). | - 79 - |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|---------|
| FIG. 3.1.- FASES DEL PROCESO DE DISEÑO QUE RECONOCEN MÚLTIPLES RETROALIMENTACIONES E ITERACIONES (BUDYNAS, 2008). | - 85 - |
| FIG. 3.2.- PEPEÑA DE ALIMENTOS DESECHADOS EN LA CENTRAL DE ABASTO [FOTO JESÚS VILLASECA] (SERVÍN, 2012). | - 86 - |
| FIG. 3.3.- DESHIDRATADOR IMPULSA EN FUNCIONAMIENTO; 1) TÚNEL DE SECADO, 2) CHAROLAS CON PRODUCTO (JITOMATE Y MANZANA), 3) SOPLADOR, 4) SERPENTÍN CALEFACTOR, 5) CALENTADOR DE AGUA PARA SIMULAR EL FLUJO GEOTÉRMICO | - 88 - |
| FIG. 3.4 BOCETO DE DESHIDRATADOR GEOTÉRMICO. | - 90 - |
| FIG. 3.5 PROPUESTA DE DISEÑO EN MAQUETA, VISTA FRONTAL [HECHA POR EL AUTOR] | - 91 - |
| FIG. 3.6 PROPUESTA DE DISEÑO EN MAQUETA, VISTA LATERAL [HECHA POR EL AUTOR] | - 91 - |
| FIG. 3.7 DESHIDRATADOR, PROPUESTA DE DISEÑO VISTA FRONTAL [HECHA POR EL AUTOR] | - 92 - |
| FIG. 3.8 DETALLE DE LA TUBERÍA ALETADA (ALEJANDRO, 2009). | - 95 - |
| FIG. 3.9 ARREGLO TRIANGULAR. A) VISTA FRONTAL; B) VISTA LATERAL | - 97 - |
| FIG. 3.10 MUESTRAS DE JITOMATE PARA SU DESHIDRATACIÓN. | - 100 - |
| FIG. 3.11 PESADO DE MUESTRAS DE JITOMATE | - 101 - |
| FIG. 3.12 CURVA SECADO DE JITOMATE MUESTRA 1 | - 102 - |
| FIG. 3.13 CURVA SECADO DE JITOMATE MUESTRA 2 | - 102 - |
| FIG. 3.14 CURVA SECADO DE JITOMATE MUESTRA 3 | - 102 - |
| FIG. 3.15 TEMPERATURA ALCANZADA DENTRO DEL DESHIDRATADOR (1RA CORRIDA) | - 103 - |
| FIG. 3.16 TEMPERATURA ALCANZADA DENTRO DEL DESHIDRATADOR (2DA CORRIDA) | - 103 - |

CAPÍTULO 4

| | |
|---|---------|
| FIG. 4.1 SISTEMA DESHIDRATADOR DE ALIMENTOS IIDEA | - 105 - |
|---|---------|

| | |
|---|---------|
| FIG. 4.2 SISTEMA DESHIDRATADOR VISTA ALAMBRE | - 106 - |
| FIG. 4.3 CAMBIADOR DE CALOR CON ARREGLO TRIANGULAR PARA LA CALEFACCIÓN DEL AIRE | - 107 - |
| FIG. 4.4 CAMBIADOR DE CALOR ARREGLO TRIANGULAR VISTA ALAMBRE | - 108 - |
| FIG. 4.5 ESPIGUERO CON CHAROLA PARA EL DESHIDRATADO DE ALIMENTOS; VISTA SÓLIDO Y ALAMBRE RESPECTIVAMENTE- | 109 - |
| FIG. 4.6 CAMPANA DE EXTRACCIÓN DE AIRE | - 110 - |

CAPÍTULO 6

| | |
|--|---------|
| FIG. 6.1 CELDA UNITARIA DE UN ARREGLO TRIANGULAR | - 124 - |
| FIG. 6.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS BALANCES DE MASA Y ENERGÍA..... | - 129 - |

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|--------|
| TABLA 1-1 ÚLTIMA ACTUALIZACIÓN 05 2013 (ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA MEXICANA) | - 25 - |
| TABLA 1-2 CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS SEGÚN SU TEMPERATURA (JAIMES, 2008). | - 34 - |
| TABLA 1-3.- CAPACIDADES DE LOS CUATRO CAMPOS GEOTÉRMICOS PRODUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA (GEOTERMIA, 2007-2013). | - 43 - |
| TABLA 1-4.- RESPECTO A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA (IDAE; IGME, 2008). | - 44 - |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|--------|
| TABLA 2-1.- MEZCLA DE GASES QUE CONFORMAN LA ATMÓSFERA; ESTOS DATOS SE REFIEREN AL AIRE SECO, PERO LA HUMEDAD PUEDE VARIAR DEL 0% AL 4% (GORIBAR, 1984). | - 56 - |
| TABLA 2-2.- COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AIRE (GORIBAR, 1984). | - 56 - |
| TABLA 2-3 RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE HUMEDAD EN BASE HÚMEDA Y HUMEDAD EN BASE SECA. | - 66 - |
| TABLA 2-4 CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO EN UN SECADOR VERTICAL | - 67 - |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|---------|
| TABLA 3-1 TABLA DE SECADO DE JITOMATE | - 101 - |
|---|---------|

NOMENCLATURA

| | |
|----------------|--|
| A_{fin} | Área de aleta |
| A_{in} | Área sección transversal interna |
| $A_{paso,f}$ | Área paso de flujo |
| A_s | Área de transferencia de calor |
| A_{Total} | Área total de tubo |
| A_o | Área de tubo desnudo |
| A_ω | Actividad de agua |
| C | Concentración |
| C_{max} | Capacidad máxima calorífica del fluido |
| C_{min} | Capacidad mínima calorífica del fluido |
| C_{pipe} | Constante por accesorios |
| C_p | Capacidad térmica específica a presión constante |
| $C_{p_{agua}}$ | Capacidad térmica específica del agua |
| $C_{p_{air}}$ | Capacidad térmica específica del aire |
| $C_{p_{geo}}$ | Capacidad térmica específica del agua geotérmica |
| C_v | Capacidad térmica específica a volumen constante |
| D | Difusividad |
| D_e | Diámetro para transferir calor |
| D_f | Diámetro equivalente de fricción |
| D_H | Diámetro hidráulico |
| e_{fin} | Espesor de aleta |
| E_f | Eficiencia del secador |

| | |
|-----------------|------------------------------|
| E_{ideal} | Energía ideal suministrada |
| f_f | Factor de fricción |
| F | Factor de corrección |
| G | Densidad de flujo de aire |
| G_s | Masa velocidad |
| \vec{g} | Gravedad |
| h_c | Coefficiente de convección |
| H | Entalpía de aire atmosférico |
| H_a | Entalpía de agua |
| H_{bh} | Humedad de bulbo húmedo |
| H_{elim} | Humedad eliminada |
| H_{fin} | Humedad final |
| H_{ini} | Humedad inicial |
| H_{bs} | Humedad de bulbo seco |
| H_v | Entalpía de vapor de agua |
| HR | Humedad relativa |
| Jh | Correlación de Jameson |
| L | Calor latente |
| L_1 | Largo de tubo |
| L_2 | Ancho del cambiador de calor |
| L_3 | Alto del cambiador de calor |
| m_a | Masa de agua extraída |
| m_s | Masa de producto seco |
| \dot{m}_{air} | Flujo másico de aire |

| | |
|-----------------|---|
| \dot{m}_a | Flujo másico de agua |
| \dot{m}_{a1} | Flujo másico de agua por cambiador de calor |
| \dot{m}_{geo} | Flujo másico de agua geotérmica |
| \dot{m}_s | Masa deshidratada por unidad de tiempo |
| M | Masa producto seco |
| Ma | Masa de agua a evaporar |
| M^* | Masa húmeda |
| M_{ev} | Capacidad de evaporación |
| MWe | Mega Watt eléctrico |
| MWt | Mega Watt térmico |
| N_L | Número de moléculas condensadas |
| N_v | Número determinado de moléculas de líquido en vapor |
| NTU | Unidad de Transferencia Térmica |
| Nu | Nusselt |
| P | Presión parcial de vapor de agua del alimento |
| P_p | Perímetro proyectado |
| P_{sat} | Presión de saturación a la temperatura del aire |
| P_{speed} | Presión de velocidad |
| P_0 | Presión parcial de vapor de agua pura |
| Pr | Prandtl |
| \dot{Q} | Energía térmica transmitida por unidad de tiempo |
| \dot{Q}_{a1} | Energía térmica transmitida por cambiador de calor |
| Q_L | Energía asociada a un calor latente |
| r | Coordenada radial |

| | |
|---------------|--|
| $R_{conv,1}$ | Resistencia térmica por convección del agua |
| $R_{conv,2}$ | Resistencia térmica por convección del aire |
| Re_D | Reynolds equivalente |
| $R_{f,i}$ | Resistencia térmica asociada a las incrustaciones de agua |
| $R_{f,o}$ | Resistencia térmica asociada a las incrustaciones del aire |
| R_t | Rendimiento térmico |
| t | Tiempo |
| t_d | Tiempo de secado decreciente |
| T | Temperatura |
| T_{a-in} | Temperatura agua a la entrada |
| T_{a-out} | Temperatura agua a la salida |
| T_{amb} | Temperatura ambiente |
| T_{ae} | Temperatura aire de entrada |
| T_{as} | Temperatura aire de salida |
| T_{geo-in} | Temperatura agua geotérmica a la entrada |
| $T_{geo-out}$ | Temperatura agua geotérmica a la salida |
| T_h | Temperatura termómetro húmedo |
| T_s | Temperatura superficial del alimento |
| U | Coefficiente global de transferencia de calor |
| VLN | Volumen Libre Neto |
| V | Velocidad secado en función masa sólido |
| V_a | Velocidad del agua dentro del cambiador de calor |
| V_A | Velocidad secado de la superficie del sólido |
| V_C | Velocidad constante de la superficie del sólido seco |

| | |
|--------------------|--|
| V_{fan} | Velocidad de ventilador |
| V_{inte} | Volumen de unidad |
| v | Volumen específico |
| w | Peso específico |
| \dot{W}_{fan} | Potencia ventilador |
| ω | Humedad absoluta |
| ΔP | Diferencia de presión |
| ΔP_{pipe} | Pérdida de presión en tuberías |
| ΔT_{ml} | Diferencia de temperatura media logarítmica |
| ΔX | Humedad ganada por cada kilogramo de aire seco |
| z | Espesor de alimento |
| ε | Efectividad del intercambiador |
| η_{fin} | Eficiencia de aleta |
| μ_a | Viscosidad dinámica del agua |
| ρ_a | Densidad agua |
| ρ_{air} | Densidad aire |
| $\bar{\rho}_{air}$ | Densidad aire promedio |
| $\rho_{air.in}$ | Densidad aire de entrada |
| $\rho_{air.out}$ | Densidad aire de salida |
| ρ_{fan} | Densidad aire de ventilador |
| ϕ_{fin} | Diámetro de aleta |
| ϕ_{in} | Diámetro interno de aleta |
| ϕ_{out} | Diámetro exterior de tubo |
| Ψ | Pérdida por accesorios |

| | |
|------|------------------------|
| #fan | Número de ventiladores |
| #fil | Número de filas |
| #fin | Número de aletas |

Capítulo 1 Energía geotérmica

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expondrán los conceptos sobre energía geotérmica, antecedentes, usos directos y aspectos económicos y ambientales. Con el objetivo de tener las bases fundamentales teóricas para un mejor entendimiento del tema.

México cuenta con un gran potencial geotérmico que no está siendo aprovechado, por el contrario, se ha estancado e incluso la producción de las geotermoeléctricas ha disminuido.

Los recursos geotérmicos se clasifican en diferentes sistemas, dependiendo del medio donde se encuentren. Este trabajo profundizará en los usos directos de los sistemas hidrotermales.

1.2 GEOTERMIA

Geotermia proviene del griego “geos” (tierra) y “thermos” (calor), calor de la Tierra. Para fines prácticos de la ingeniería la *“Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra.* Esta definición es oficial en Alemania (VDI 4640) y ha sido adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC). Engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.”¹

Hace aproximadamente 4,500 millones de años la Tierra era una gran masa de fuego. Posteriormente 700 millones de años más tarde (hace 3,800 millones de años) se formó una corteza dura que atrapó en su interior una gran cantidad de energía, como energía térmica. Nuestro planeta está conformado por tres capas principales: **Corteza, Manto y Núcleo.**

Corteza: tiene una profundidad aproximada de 5 a 20 km bajo el fondo marino y de 30 a 70 km bajo la superficie de la corteza conocida como litósfera. Las temperaturas en esta región son aproximadamente 1000 °C a 15 ó 20 °C en la superficie.

Manto: La temperatura en esta zona oscila entre los 3000 °C a los 1000 °C

¹ Trillo, Guillermo Llopis, Guía de la Energía Geotérmica, La Suma de Todos, p.26

Núcleo: Es la zona más caliente de las dos capas anteriores. Su temperatura se encuentra alrededor de 4200 °C.

El calor de la Tierra o Geotermia era usualmente utilizado con fines recreativos, como lo son parques termales.



Fig. 1.1.- Acantilado de más de 200 m de altura con manifestaciones de aguas termales en Pamukkale, Turquía (Trillo).

La energía geotérmica remonta lentamente hasta la superficie, pues las rocas de la corteza terrestre son muy malas conductoras del calor.

El flujo de calor se calcula multiplicando el gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas.

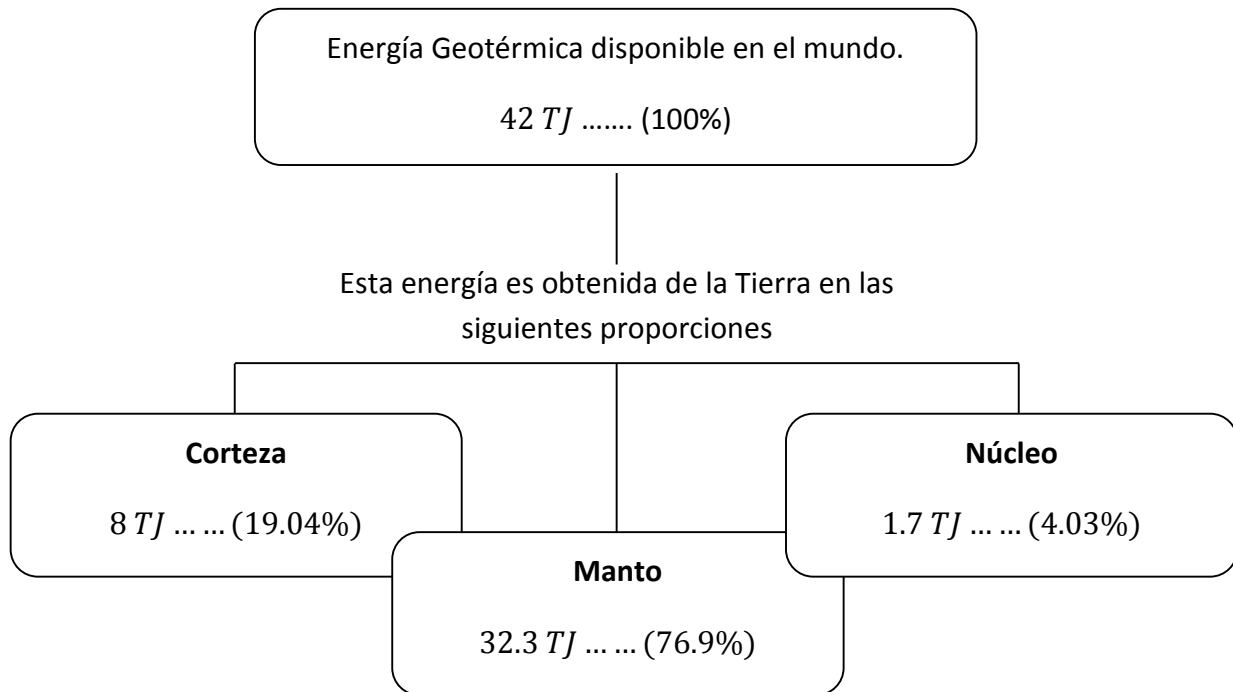
El gradiente geotérmico es la variación de temperatura en función de la profundidad, expresado en °C/km.

La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material, que indica su capacidad para conducir el calor y se expresa en $W/m\ ^\circ C$

El producto de estas dos cantidades proporciona el flujo de energía en forma de calor, por unidad de superficie y por unidades de tiempo. Se expresa en W/m^2

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. Dicho gradiente en promedio va de 2.5 a 3 °C/100 m. Por ejemplo, si la temperatura dentro de los primeros metros por debajo de nivel del suelo, que en promedio corresponde a la temperatura media anual del aire exterior, es de 15 °C, entonces podemos

suponer que la temperatura será de unos 65 °C - 75 °C a 2,000 m de profundidad, 90 °C - 105°C a 3000 metros y así sucesivamente para otros miles de metros.



1.3 HISTORIA

Las regiones con presencias de nodos termales, representados principalmente por volcanes, han sido puntos concurridos por la humanidad, ya que se tiene la ventaja de una fuente calefactora utilizada para cocer alimentos o simplemente bañarse.

Los restos arqueológicos más antiguos relacionados con la energía geotérmica han sido encontrados en Niisato, Japón, y son objetos tallados en piedra volcánica que datan de la Tercera Glaciación, entre 15, 000 y 20, 000 años A.C.

Los paleo-Indios de América del Norte, utilizaban las aguas termales para cocinar alimentos, mientras que sus minerales eran utilizados con propósitos medicinales. Los manantiales termales eran zonas neutrales donde los miembros de las naciones guerreras debían bañarse juntos en paz.

Tiempo más tarde los griegos y posteriormente los romanos dejaron numerosos ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en las tradicionales termas y baños públicos, que se convirtieron en gigantescos centros de ocio, salud y negocio. Las termas de Caracola, en Roma, tenían un aforo para 1,600 personas al día.

Estas prácticas fueron extendidas por los romanos y con el tiempo llegaron a Japón, América y Europa.

En Francia, alrededor del año 1330, algunas casas en Chaudes-Aigues se beneficiaban del servicio de agua caliente, gracias a una red de distribución por cuyo mantenimiento pagaban una tasa de interés. Dicho recurso también era utilizado para lavar lanas y pieles.

Por la misma época en Italia se practicaba la extracción de minerales de lagunas con agua salobre de las que escapaba vapor a más de 100 °C, el recurso que se extraía era ácido sulfúrico concentrado y alumbre. Otros recursos extraídos ligados a las fuentes termales son el azufre, travertinos, caolines, limonitas y óxidos de hierro. Actualmente hay regiones en las que se sigue extrayendo el azufre de manera artesanal.



Fig. 1.2.- Mina artesanal de azufre del volcán indonesio Ijen (Cruz, 2010).

Durante mucho tiempo el hombre se conformó con la explotación de los recursos geotérmicos que afloraban en la superficie. A partir del siglo XIX, los avances técnicos permitieron explotar el calor a mayor profundidad.

En 1818, en Larderello, Toscana (Italia), se explotaron por vez primera las sales de boro con fines industriales; y en 1827 el fundador de esta industria, el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema para aprovechar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, dejando de lado la combustión de la madera.

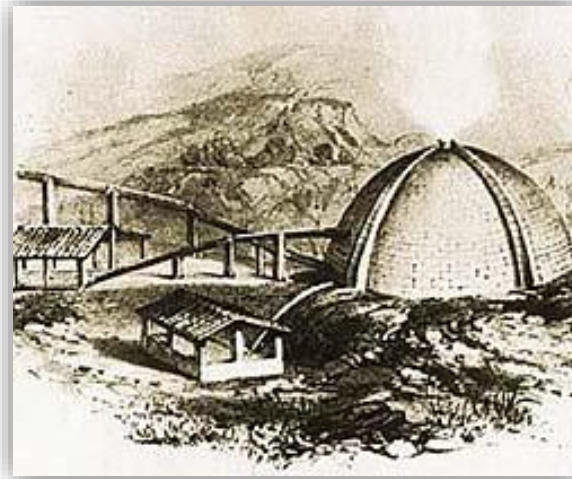


Fig. 1.3.- Industria química para extraer el ácido bórico de las aguas calientes que emergían naturalmente (geothermalenergy).

El primer pozo perforado de manera artesanal se hizo en Francia, en 1833, con una profundidad de 548 m, para su elaboración se requirió invertir 8 años de trabajo; tiempo después en Estados Unidos, la primera red local de calefacción urbana se instaló en Boise, Idaho en 1892.



Fig. 1.4.- Fuente en la frontera sur de Francia, Auvernia, con agua de 82 °C (ADEME y BRGM).

Con el desarrollo de las poblaciones hacia una civilización moderna, se recurrió a la energía geotérmica para dar abasto a las necesidades energéticas que dicha civilización había estado demandando. Todo comenzó a principios de 1913, en Larderello, Italia, con el primer dispositivo capaz de generar 250 kW de energía eléctrica. A finales de la Segunda

Guerra Mundial las tropas alemanas durante su retirada, destruyeron por completo la central, los pozos y las tuberías. Después de la Segunda Guerra Mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica al considerarla competitiva respecto de otras fuentes de energía.

Los primeros usos directos de la geotermia después de la balneología, fueron la calefacción de invernaderos y de edificios industriales así como residenciales. La primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica se instaló en Reikiavik, Islandia, en 1930. Desde entonces, se extendió por todo el mundo este novedoso sistema de calefacción y se instalaron plantas en Francia, Italia, Hungría, Rumanía, Rusia, Turquía, Georgia, China, Estados Unidos y en la propia Islandia, donde, actualmente 95% de sus habitantes tiene calefacción por medio de una red de 700 km de tuberías aisladas que transportan agua caliente.

Para la década de los años setenta, incrementó la investigación y exploración de recursos geotérmicos con la finalidad de utilizarlos para generación eléctrica, calefacción y agua caliente.

1.4 GEOTERMIA EN EL MUNDO

En el año 2000, la capacidad geotermo-eléctrica instalada a nivel mundial era de 8,000 MWe, pasando a 9,000 MWe en el año 2005. Por lo que respecta a los usos no eléctricos de la energía geotérmica, en el año 2000 la capacidad instalada en 59 países era de unos 15,000 MWt. En 2005, la capacidad instalada en 72 países ascendió a alrededor de 28,000 MWt, de los cuales unos 15,000 MWt, correspondían a bombas de calor geotérmicas.

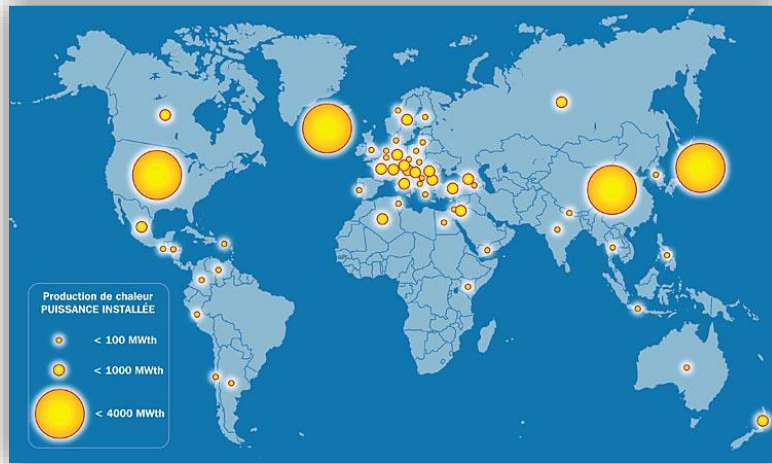


Fig. 1.5.- Producción de calor por país (potencia instalada en 2000) (ADEME y BRGM).



Fig. 1.6.- Principales países productores de energía eléctrica con geotermia (Potencia instalada en 2000) (ADEME y BRGM).

A principios de 2012, la asociación de energía geotérmica (GEA por sus siglas en inglés), identificó 11,224 MW de energía eléctrica instalada entre 24 países de todo el mundo.

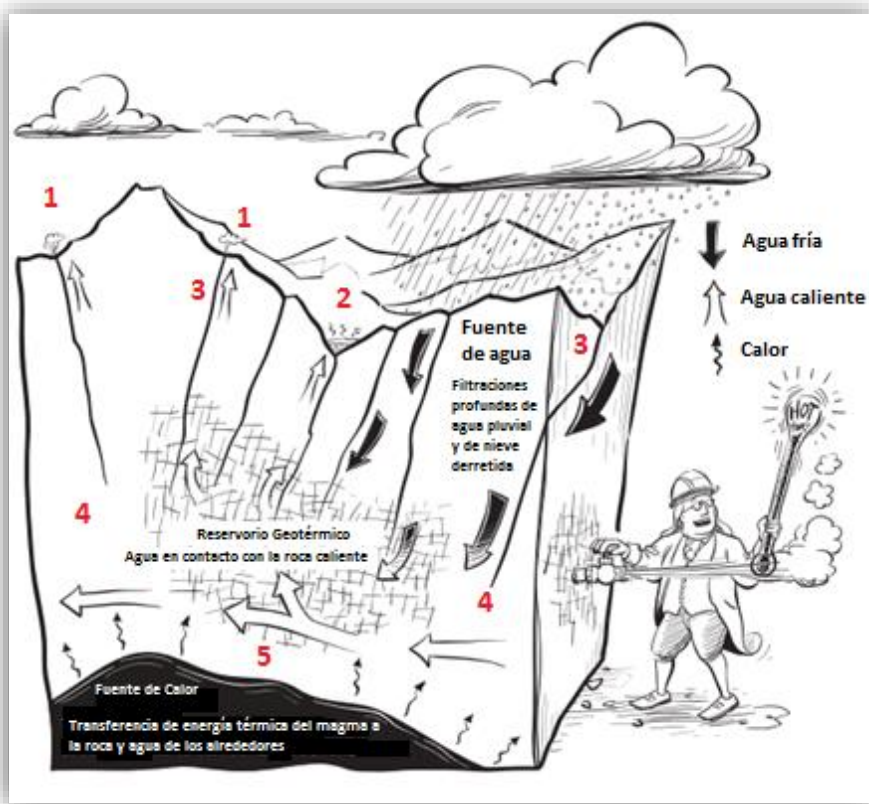
| | País | MWe |
|----|--------------------|-----------------|
| 1 | Estados Unidos | 3,389.0 |
| 2 | Filipinas | 1,848.0 |
| 3 | Indonesia | 1,341.0 |
| 4 | México | 1,017.4 |
| 5 | Italia | 875.5 |
| 6 | Nueva Zelanda | 842.6 |
| 7 | Islandia | 664.4 |
| 8 | Japón | 537.0 |
| 9 | Kenia | 248.5 |
| 10 | Costa Rica | 207.1 |
| 11 | El salvador | 204.4 |
| 12 | Turquía | 166.6 |
| 13 | Nicaragua | 149.5 |
| 14 | Rusia | 81.9 |
| 15 | Papua Nueva Guinea | 56.0 |
| 16 | Guatemala | 48.0 |
| 17 | Portugal | 28.5 |
| 18 | China | 27.0 |
| 19 | Francia | 17.0 |
| 20 | Alemania | 11.9 |
| 21 | Etiopía | 8.0 |
| 22 | Austria | 1.4 |
| 23 | Australia | 1.0 |
| 24 | Tailandia | 0.3 |
| | TOTAL | 11,772.0 |

Tabla 1-1 Última actualización 05 2013 (Asociación Geotérmica Mexicana)

1.5 RECURSOS GEOTÉRMICOS

1.5.1 Sistemas hidrotermales

Estos sistemas almacenan agua y/o vapor gracias a sus rocas impermeables, que funcionan como una capa sello. Dichas rocas son calentadas por una intrusión de magma en la corteza terrestre. El fluido que existe en los sistemas hidrotermales tiene su origen como agua meteórica (agua de lluvia, hielo o de nieve). Con el paso del tiempo el agua se va infiltrando lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando varios kilómetros de profundidad en donde finalmente es acumulada, al entrar en contacto con rocas calientes en el interior de la tierra, el agua es calentada y en dicha interacción puede alcanzar en ocasiones temperaturas de hasta 500 °C.



1. Fumarola
2. Emanaciones calientes
3. Falla geológica
4. Roca Caliente
5. Rocas con altas temperaturas

Fig. 1.7.- Sistema Hidrotermal (Trillo).

Estos sistemas se pueden sub-clasificar como yacimientos de vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía. Por lo general si el yacimiento tiene una temperatura superior a 200 °C, se asociará con sistemas volcánicos y la tectónica de placas, mientras que a temperaturas menores se relacionará con sistemas no volcánicos, siendo estos últimos los más comunes. Los sistemas convectivos hidrotermales son los sistemas geotérmicos que más se explotan comercialmente, para generar electricidad o para usos directos.

1.5.2 Sistema de roca seca caliente

Este recurso se encuentra por lo general a grandes profundidades. En este sitio lo único que hay son rocas que conservan un alto grado energético en forma de calor, siendo utilizadas como cambiadores de calor, para hacerlo más eficiente se hace una hidrofracturación para crear el reservorio rocoso fracturado, con el fin de hacer circular agua y calentarla, por lo que se inyecta agua fría a alta presión en la perforación, donde las rocas tienen una temperatura aproximada de 200°C, bajo el efecto de la presión, el agua dilata las grietas existentes en el interior del pozo y dicho pozo puede tener varias ramificaciones en su interior. Una vez inyectada el agua, esta rápidamente gana calor y sube por un pozo denominado pozo de producción; en la central geotérmica, el agua transmite su energía térmica al segundo circuito cerrado, equipado con una turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico. Después del enfriamiento, el agua del primer circuito regresa al "depósito" rocoso por el pozo de re- inyección, para que se caliente de nuevo.

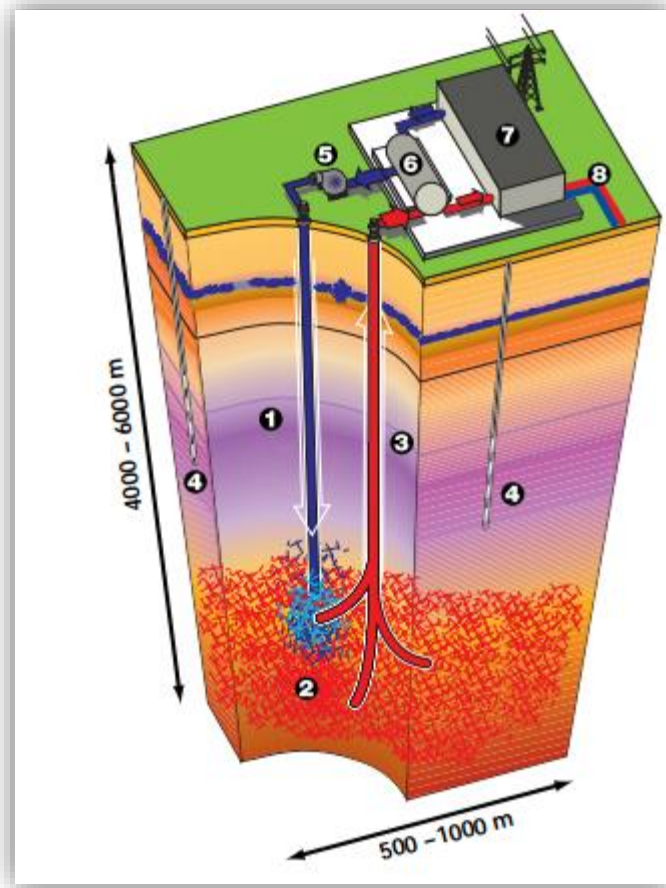


Fig. 1.8.- Roca seca caliente (Trillo).

1. Pozo de exploración
2. Reservorio rocoso fracturado
3. Pozo de producción
4. Pozo de observación

5. Bomba de circulación
6. Intercambiador de calor
7. Central eléctrica
8. Red de calefacción a distancia

1.5.3 Sistemas marinos

En el fondo del océano se han encontrado fuentes de agua muy caliente, en el Golfo de California, se han identificado varios puntos de ventilas hidrotermales. Las ventilas hidrotermales son fisuras del piso oceánico de las que sale agua calentada geotérmicamente. Se encuentra cerca de sitios volcánicos activos en los que las placas tectónicas se están separando y dejan espacios por los que se filtra agua oceánica con temperatura de 2 a 4 °C. Al calentarse el agua por su proximidad con la cámara magmática, la diferencia de densidad ocasiona su expulsión a manera de géiser submarino (con temperaturas mayores a 300°C), disolviendo a su paso los contenidos minerales de roca de la propia corteza.

Las ventilas hidrotermales ocurren a grandes profundidades, de más de 1500 metros y en donde la presión es de más de 300 atmósferas. El tamaño de las ventilas puede ir de unos cuantos centímetros a más de tres metros. El agua que sale de las ventilas está cargada con minerales y el color de los chorros de agua que salen depende del tipo y concentración de minerales disueltos en el agua.



Fig. 1.9.- Geofísica. Ventila hidrotermal [foto UNAM].

1.5.4 Sistemas magmáticos

Son sistemas de roca fundida dentro de las cámaras magmáticas de los volcanes. Lo que hace fascinante a dicho recurso, son las altas temperaturas a las que se encuentra, superiores a los 800 °C. La desventaja con este recurso es que aún no se encuentran materiales disponibles que sean lo suficientemente resistentes a las altas temperaturas.

Sin embargo “Islandia ha dado un paso al frente en el desarrollo de la energía renovable al inaugurar el primer sistema de energía geotérmica basado en magma, para lo que tuvo que perforar 2,1 kilómetros de corteza terrestre.”(RT sepa más, 2014)

El pozo IDDI-1 se localiza al noroeste de Islandia en Krafla, a un costado de uno de los volcanes más grande de la isla. Un documento citado por el Iceland Deep Drilling Project, un consorcio del Ministerio de Energía de Islandia y las principales compañías de energía del país, aseguran que la potencia disponible bastaba para generar hasta 36 MW de electricidad, en comparación con la capacidad eléctrica instalada de 60 MWe en la planta de energía de Krafla.



Fig. 1.10 Pozo de Krafla al noroeste de Islandia (RT sepa más, 2014).

Si bien no es el primer pozo que alcanza el magma, sí es el primer sistema capaz de utilizar el calor del manto para producir una tubería de vapor capaz de alimentar una planta productora de electricidad. La temperatura del vapor sobrecalentado y a alta presión alcanza los 450 grados centígrados.



Fig. 1.11.- Volcán a un costado del lago Mývatn en la ciudad de Akureyi, en la parte norte de Islandia (Ser Turista, 2014)

1.5.5 Sistema geopresurizado

Los sistemas geopresurizados son reservorios profundos de agua caliente de alta presión que contienen metano disuelto. En el estado de Texas, existe una planta de demostración, que produce electricidad a partir de recursos geopresurizados. Las pruebas preliminares se llevaron a cabo durante 1979 (fase 0), los límites de depósito de pruebas durante 1980 (fase I), y las pruebas a largo plazo (fase II) se llevó a cabo durante 1981-1983. Una vez que esta planta fue considerada un éxito, fue desmantelada.



Fig. 1.12.- Planta de demostración en Texas (Geothermal energy association, 2013).

1.6 USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Las diversas aplicaciones que se le pueden dar a un fluido geotérmico depende en gran medida del contenido energético térmico, o lo que es lo mismo, de su entalpía.

Por entalpía debe entenderse la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Tiene unidades de medida en kJ/kg o bien kcal/kg.

Actualmente no existe un dispositivo que permita medir la entalpía directamente, pero si es posible determinar la temperatura del fluido geotérmico. Debido a que la temperatura y la entalpía pueden considerarse, más o menos, proporcionales; se ha elaborado la siguiente tabla en la que se muestran diferentes intervalos de temperatura para los diferentes usos directos más comunes en la industria.



Fig. 1.13.- Principales usos de la energía geotérmica como una función de la temperatura (Trillo).

El criterio más utilizado para la clasificación de los recursos geotérmicos es por su temperatura, ya que como se mencionó, la entalpía y temperatura guardan una estrecha relación. Con esta clasificación se puede dividir en recursos de baja, media o alta entalpía; como se observa en la Tabla 1-2. La bondad de clasificar los recursos con este criterio estriba en la rápida identificación de saber qué tanta energía podría ser extraída del fluido y en qué aplicaciones podría aprovecharse. En el presente trabajo se adoptará la clasificación hecha

por Muffler y Cataldi, en la que se consideran tres posibles categorías: recursos de baja, media o intermedia y alta entalpía.

| (Jaimes, 2008) | Muffler y Cataldi | Micholson | Gunnlaugsson y Axelsson |
|---------------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| Recursos De baja entalpía | < 90 °C | ≤150 °C | ≤190 °C |
| Recursos de entalpía intermedia | 90 – 150 °C | - | - |
| Recursos de alta entalpía | > 150 °C | > 150 °C | > 190 °C |

Tabla 1-2 Clasificación de los recursos geotérmicos según su temperatura (Jaimes, 2008).

Como se mencionó anteriormente, los usos directos están relacionados con recursos geotérmicos cuya calidad energética es baja y se encuentra en la categoría de baja temperatura. A continuación se explicarán dichas aplicaciones.

1.6.1 Sector residencial y servicios

La calefacción ambiental y distrital ha tenido un gran desarrollo en Islandia, pero está teniendo un gran auge en países de Europa Oriental, como también en Estados Unidos, China, Japón, Francia, etc.

Estos sistemas de calefacción distrital requieren de fuertes inversiones de capital; los costos principales son la inversión inicial, perforación de pozos de producción y de reinyección, en bombas de pozos, tuberías y redes de distribución, equipos de monitoreo y control, estaciones de peaking y estanques de almacenamiento, por otro lado si comparamos los costos de operación con los sistemas convencionales como energía de bombeo, sistemas de mantenimiento, control y gestión veremos que son muy bajos.

La refrigeración es una operación factible para utilizar la geotermia mediante la adaptación de equipos de absorción, la tecnología de estos equipos es una tecnología madura y por ende muy conocida en el mercado. El ciclo de absorción es un proceso que utiliza calor como fuente de energía en vez de electricidad. El proceso de enfriamiento es posible gracias al empleo de 2 fluidos: un refrigerante, que circula, se evapora y condensa, y un segundo fluido o absorbente. Para aplicaciones sobre 0°C (principalmente en refrigeración y

procesos de aire acondicionado), el ciclo utiliza bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para aplicaciones bajo 0°C se emplea un ciclo de amoníaco/agua, con amoníaco como refrigerante y agua como absorbente, los fluidos geotermales proporcionan la energía geotérmica que alimenta estos equipos, a pesar que su eficiencia disminuye con temperaturas menores a 105 °C.

Por otra parte el aire acondicionado geotérmico poco a poco se ha ido expandiendo conjuntamente con la introducción de bombas de calor, las bombas de calor permiten utilizar la energía térmica contenida en cuerpos de baja temperatura como suelos, acuíferos someros, lagunas, etc.

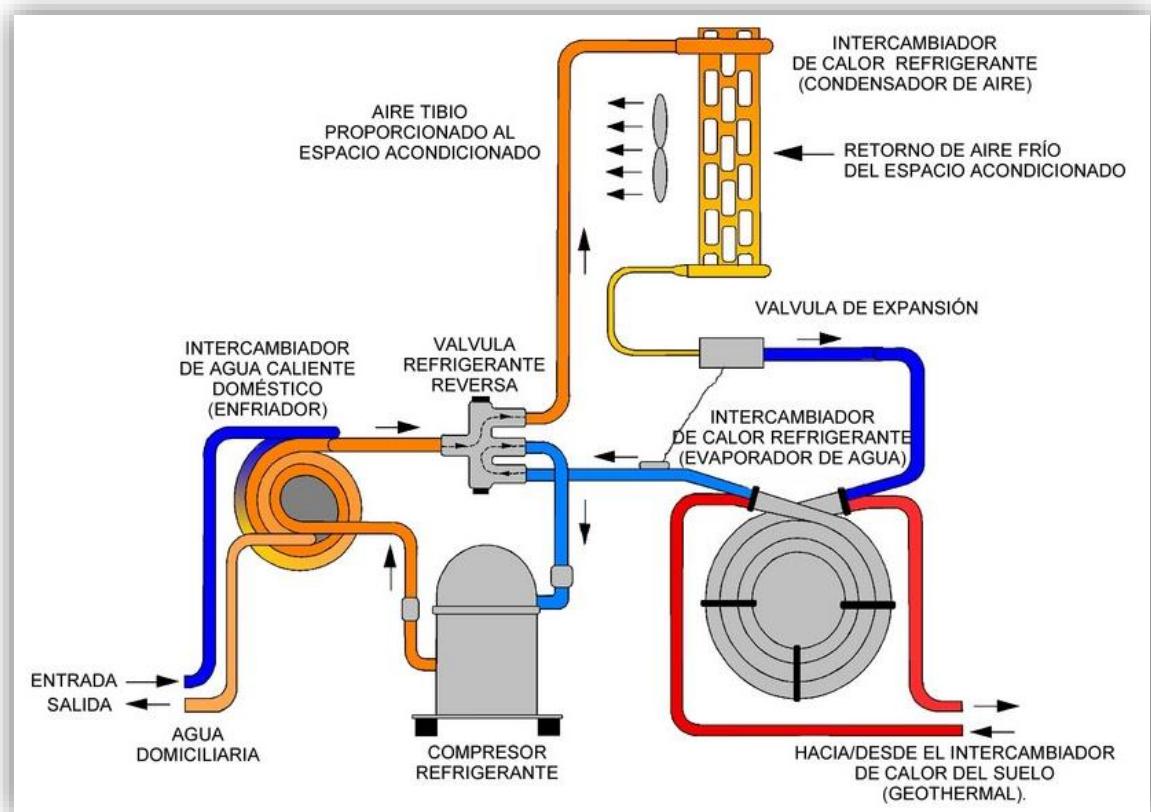


Fig. 1.14.- Esquema de una bomba de calor en calefacción (Geo-Heat Center, 2012).

1.6.2 Procesos industriales

El agua caliente de las reservas geotérmicas puede ser utilizada en las grandes industrias que requieren de procesos que incluyen calor, algunos ejemplos de estos procesos son: calefacción, evaporación, secado, esterilización, destilación, lavado, descongelado, extracción de sales, producción y reciclado de papel, tratamientos textiles, recuperación de productos petrolíferos, extracción de CO₂, elaboración de bebidas carbonatadas, etc.



Fig. 1.15.- Uso geotérmico en planta cementera, Alemania (IDAE; IGME, 2008).

1.6.3 Acuicultura

Es la técnica controlada de especies acuáticas, vegetales y animales que, día con día adquiere mayor popularidad en el mercado a nivel mundial; manteniendo artificialmente una temperatura óptima es posible cultivar más especies exóticas e incluso duplicar el ciclo reproductivo, las especies típicamente cultivadas son: carpas, robalos, angulas², esturiones, langostas, cangrejos, almejas, mejillones, barbos, salmonetes, salmones, camarones, cangrejos de río, ostras, ostiones y abulones.

Las temperaturas que se requieren para especies acuáticas son generalmente del orden de 20-30 °C. El tamaño de la instalación dependerá de la temperatura del recurso geotérmico, de la temperatura requerida en las piletas de peces y de la pérdida de calor de éstas.

² Es el nombre que recibe el alevín (crías recién nacidas de peces) de la anguila.

El cultivo de Spirulina (micro alga que prospera en climas cálidos y aguas alcalinas) puede ser una magnífica alternativa contra el problema del hambre en países más pobres del mundo, aun cuando actualmente es vendida como un suplemento alimenticio.



Fig. 1.16.- Piscifactoría El Alba en Sobrescobio, España (La Cuenca del Nalón).

1.6.4 Invernaderos y esterilización de suelos

En la agricultura el empleo de este recurso es muy utilizado para la calefacción del campo abierto, esterilización de los suelos o invernaderos.

Una solución óptima de aplicación de la geotermia en campo abierto consiste en combinar la calefacción del suelo con el regadío, controlando cuidadosamente la composición química de las aguas termales utilizadas con este fin.

Cuando se habla de invernaderos suele pensarse únicamente en el cultivo de vegetales comestibles, pero se aplica a las plantas ornamentales, flores, entre otras. La ventaja de los invernaderos se refleja en la capacidad de producción a lo largo de todo el año, asegurando que la tierra no se congele, propiciando una estación de crecimiento más larga y un desarrollo rápido de los productos.

Cada planta responde a diferentes parámetros como:

- Intensidad y cantidad de luz.
- Temperatura diurna y nocturna.
- Concentración de CO₂ en el invernadero.
- Humedad del terreno y del aire.
- Movimiento del aire dentro del invernadero.

La calefacción del invernadero se controla con convección forzada de aire y el uso de intercambiadores de calor, los cuales son una red de tubos por donde circula agua caliente y estos pueden colocarse sobre el suelo o en su interior.

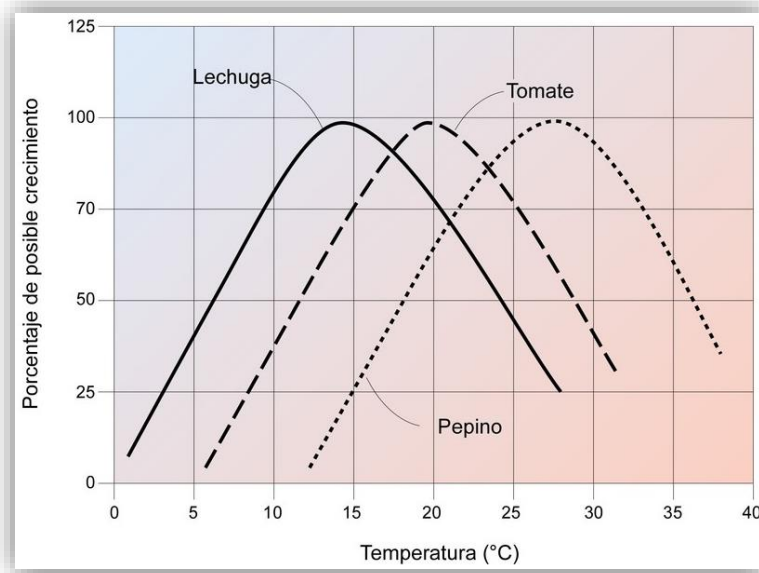


Fig. 1.17.- Curva de crecimiento de algunas cosechas (Geothermal energy association, 2013).

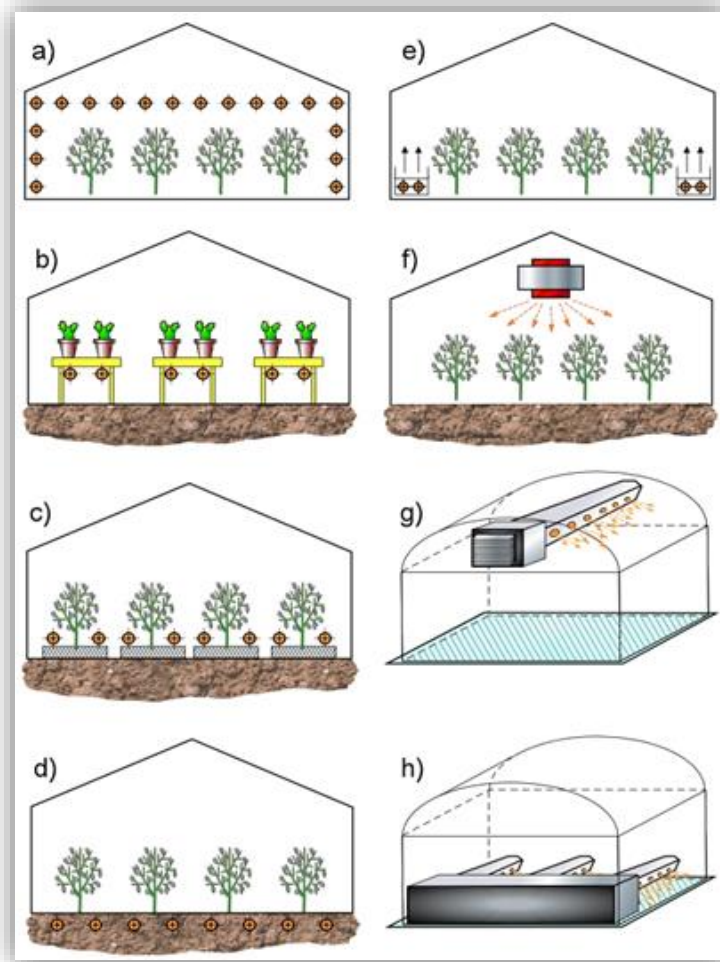


Fig. 1.18.- Invernaderos a) Ducto de calefacción aéreo; b) Calefacción de bancos; c) Ductos de calefacción bajos para calefacción de aire; d) calefacción de suelo; e) posición lateral; f) Ventilador aéreo; g) Ductos altos; h) Ductos bajos (Geothermal energy association, 2013).

Es muy importante el acondicionamiento óptimo de la temperatura ambiente, ya que propicia un inmejorable desarrollo en plantas, vegetales e incluso animales de corral o de especies acuáticas. En la calefacción de instalaciones de crianza se invierte 50% de la energía geotermal, pero de igual manera se utiliza la misma cantidad de energía para la calefacción de invernaderos, abriendo la posibilidad de combinar la crianza de animales con invernaderos geotermales, implementando para ello un sistema de calefacción en línea.

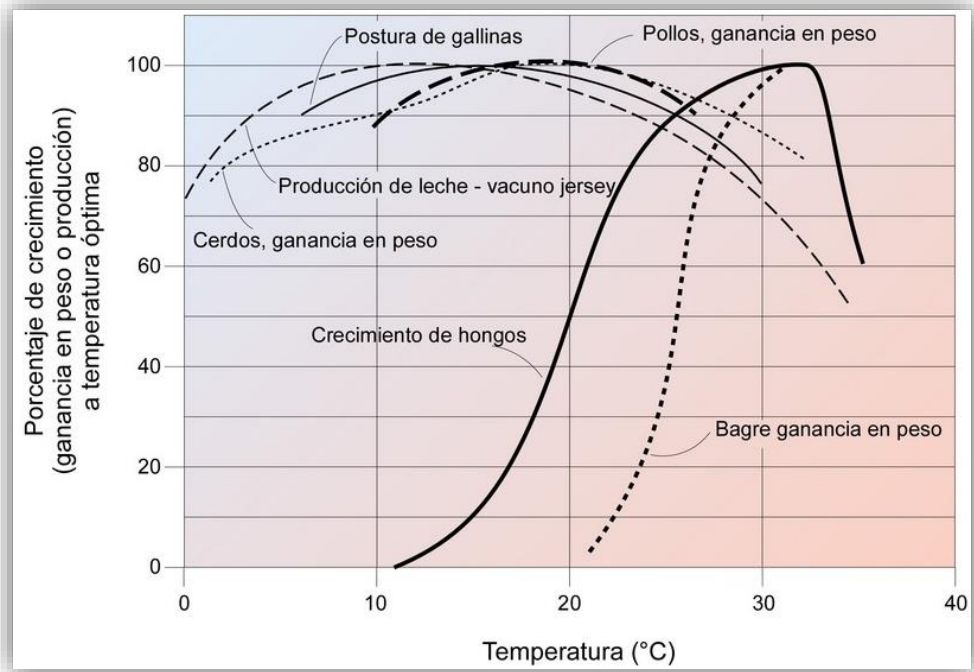


Fig. 1.19.- Efecto de la temperatura en el crecimiento o producción de animales comestibles (Geothermal energy association, 2013).

1.6.5 Deshidratado de alimentos

Con el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía puede llevarse a cabo la calefacción del aire y ser utilizado en la deshidratación de alimentos, los sistemas deshidratadores convencionales funcionan con agua calentada a partir de gas, sin embargo se ha comprobado que es posible utilizar el recurso geotérmico no solo para el deshidratado de alimentos, también para el secado de madera, papel, cerámica, entre otros.



Fig. 1.20.- Intercambiadores de calor en la estufa de secado de madera y tubería de calefacción geotérmica en los Azufres Michoacán (Alejandro, 2009).



Fig. 1.21.- Deshidratador de frutas y tanque de agua caliente en Los Azufres (Alejandro, 2009).

1.7 MÉXICO Y SU POTENCIAL GEOTÉRMICO

A nivel mundial México ocupa el 4to lugar en producción de electricidad con geotermia³, cuenta con cuatro plantas productoras: 1) Cerro Prieto en Baja California con una capacidad neta de 540 MWe, 2) Los Azufres en Michoacán con 191 MWe, 3) Los Humeros en el estado de Puebla con 68.4 MWe y 4) Tres Vírgenes, en Baja California Sur con 10 MWe.

Cerro Prieto es la segunda planta más grande del mundo. El recurso geotérmico se encuentra en roca del tipo arenisca, la profundidad de sus 164 pozos productores (en promedio) se encuentra a 2.5 Km, consume 50 millones de toneladas de vapor al año, Actualmente genera 570 MWe. Se tiene un proyecto para aumentar su producción futura con 100 MWe más.

Los azufres con 37 pozos perforados sobre roca del tipo andesítica, cuenta con cinco unidades a condensación de flasheo sencillo (una de 50 MWe y cuatro de 26.5 MWe), siete unidades a contra presión de 5 MWe cada una, anteriormente contaba con dos unidades binarias de 1.5 MWe. Desde el 2013 se encuentra en construcción otra unidad de 50 MWe, conocido como el proyecto Azufres III, esta unidad está programada para entrar en servicio en enero de 2015.

Los Humeros cuenta con ocho unidades a contra presión que en total producen 40 MWe y dos unidades a condensación de 26.7 MWe cada una, sin embargo, cinco de las unidades de 5 MWe no se encuentran en operación continua, sino que son utilizadas como respaldo cuando alguna otra debe salir a mantenimiento. Se encuentra en construcción una unidad adicional de 26.7 MWe brutos, estando programada su entrada en operación hasta el año 2016.

Tres vírgenes Opera con dos unidades a condensación de 5 MWe cada una, al año consume 475 mil toneladas de vapor. En 2005 produjo 37 GWh.

Cerritos Colorados, Jalisco, no tiene plantas en operación, pero cuenta con varios pozos perforados y un potencial evaluado por CFE en 75 MWe.

³ Últimos informes sobre el campo geotermoeléctrico Cerro Prieto, dados por CFE, su producción de 570 MWe bajo hasta 540 MWe, quedando la producción eléctrica neta en 809.4 MWe. De esta manera su posición dentro del ranking mundial ha descendido al 5to lugar (González, 2014).

| CAMPO | CAPACIDAD INSTALADA (MW) | CAPACIDAD EN OPERACIÓN (MW) |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Cerro Prieto, BC | 720 | 570 |
| Los Azufres, Mich. | 194 | 191 |
| Los Humeros, Pue. | 93.4 | 68.4 |
| Tres Vírgenes, BCS | 10 | 10 |
| Totales | 1,017.4 | 839.4 |

Tabla 1-3.- Capacidades de los cuatro campos geotérmicos productores de energía eléctrica (geotermia, 2007-2013).



Fig. 1.22.- Mapa del Recurso Geotérmico en México (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010).

Existen zonas que prometen un gran potencial geotermoeléctrico, como **Cerritos colorados** en Guadalajara, **Acoculco** en Puebla, **Soledad** en Jalisco, **Domos de San Pedro** en Nayarit, **Maguarichic** en Chihuahua, **Bahía Concepción** en Baja California y cerca del volcán **Tacana** en Chiapas.

1.8 ASPECTOS AMBIENTALES

La geotermia está considerada como una energía renovable, pues constituye una fuente inagotable de recursos energéticos. Al examinar el ciclo de vida completo de la energía geotérmica, los impactos medioambientales resultan ser menores que los provocados por las centrales térmicas de combustibles fósiles y nucleares, incluso menores en comparación con otras fuentes de energías renovables. Se dice que es una energía limpia, pues las emisiones de gases son significativamente bajas comparadas con otras fuentes térmicas de energía, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

| g/kWh | NO _x | SO ₂ | CO ₂ |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Carbón | 2 | 4.7 | 996 |
| Petróleo | 1.8 | 5.5 | 760 |
| Gas Natural | 1.3 | 0.1 | 551 |
| Geotermia (flash) | 0 | 0.1 | 27 |
| Geotermia (ciclo binario y flash/binario) | 0 | 0 | 0 |

Tabla 1-4.- Respecto a la generación eléctrica (IDAE; IGME, 2008).

Otra de las principales ventajas de la energía geotérmica es que ofrece un flujo constante de energía térmica a lo largo de todo el año, porque no depende de variaciones estacionales como las lluvias, caudales de ríos, viento, sol, etc., como es el caso de otras fuentes de energía renovables, lo cual es muy importante desde el punto de vista de la seguridad del suministro energético térmico; por lo que se le puede considerar como una energía sostenible.

1.9 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

Según la Geothermal Energy Association (GEA) de EE.UU, los empleos generados por la energía geotérmica son generalmente estables, de larga duración, muy diversificados y de alta calidad, además, el avance de la energía geotérmica contribuirá al desarrollo regional, ya que en la mayoría de los casos los recursos geotérmicos tienden a estar localizados en áreas rurales con pocas oportunidades de empleo.

El desarrollo de proyectos geotérmicos influye en:

- La creación de nuevos puestos de trabajo, estables y de alta calidad.
- El uso de la energía geotérmica en la agricultura permite disponer de los productos en cualquier época del año, favoreciendo también la producción del país y en el precio final del producto.
- Es una energía que brinda la oportunidad, a los países que la poseen, de no depender de energías como el petróleo, gas, etc., trayendo como consecuencia la disminución de sus costos de importación.
- Su utilización en la generación eléctrica, puede ayudar reduciendo las puntas de demanda eléctrica, sus aplicaciones en climatización y refrigeración.

1.10 CONCLUSIONES

La energía geotérmica se manifiesta de diversas maneras y su explotación, usos y aplicaciones están limitadas por las características del recurso geotérmico, tecnología y localización, al ser un recurso que se explota de manera local y por no poder ser trasladado como el caso del gas, petróleo, carbón, etc., pero capaz de dar respuesta a necesidades que van desde la calefacción en casas habitación, granjas, invernaderos, producción eléctrica, acuicultura, deshidratado de alimentos, secado de maderas, secado de papel, entre otro, haciendo de este recurso natural uno muy versátil, económico y amigable con el medio ambiente, por sus bajas emisiones de NOx, dióxidos de azufre y bióxido de carbono.

El potencial geotérmico en México es muy grande, lamentablemente este rubro se ha venido descuidando, pues como hemos visto la producción eléctrica ha disminuido en los últimos años y su aplicación a usos directos sólo destaca la balneología. Sin embargo con el fin de coadyuvar con información, desarrollo tecnológico, investigación y formación de recursos humanos especializados que ayuden a la exploración y explotación de la geotermia en nuestro país, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) coordinará la integración y operación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), consorcio en el que participan 22 instituciones académicas, de las cuales cinco son Institutos y centros de la UNAM, entre ellos el Instituto de Ingeniería representado por el grupo IIDEA, y 11 empresas mexicanas, interesadas en el desarrollo de una industria alrededor de la geotermia aprovechando la apertura que otorgan las recientes modificaciones constitucionales concertadas en la reforma energética.

Capítulo 2 Deshidratadores

2.1 INTRODUCCIÓN

El agua contenida en los alimentos permite la proliferación de microorganismos o el desarrollo de reacciones químicas que los deterioran, por ello cuando es necesario conservarlos por algún tiempo, una alternativa es secarlos o deshidratarlos; es decir, remover el agua contenida en su interior. Existen varios métodos para lograrlo, pero aquí solamente se considerará la forma más simple: exponer los alimentos a una corriente de aire, con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad. En este capítulo se abordarán los conceptos fundamentales correspondientes a los procesos de secado bajo corrientes de aire caliente, pero antes de explicar dichos conceptos se hablará sobre los orígenes de esta actividad milenaria, se describirá el funcionamiento de equipos deshidratadores existentes, así como su clasificación.

2.2 HISTORIA

No se sabe cuándo el hombre descubrió que la eliminación parcial de agua aumentaba la vida útil de los alimentos, pero ya la biblia menciona a las uvas, higos secos y maíz tostado⁴. Incluso antes de los registros históricos encontrados, el hombre probablemente utilizaba el secado, ahumado, salado y encurtido como medios de conservación, a menudo en forma combinada; descubriendo que se puede prevenir la alteración de los alimentos mediante un proceso de secado con sal⁵, si se combina la acción de la sal con el secado al sol se reduce la proliferación de pseudomonas⁶. El secado de pescado y carnes con este método quedó plasmado en los grabados de los egipcios 3,000 años A.C.

Hace más de 3,000 años los Incas de Perú elaboraban patatas y verduras secas aplicando los principios de la liofilización⁷, aprovechando las bajas temperaturas nocturnas congelaban las verduras por la noche, al día siguiente eran aplastadas para que exudaran los jugos, la operación se repetía hasta obtener capas muy finas que eran puestas al sol.

⁴ Lo que sugiere un método distinto de desecación al de la exposición al Sol.

⁵ La acción de la sal sobre las carnes reduce la actividad de agua

⁶ Es un género de bacilos recto o ligeramente curvados, que son proclives a la degradación de compuestos orgánicos, especialmente cepas de la especie *Pseudomonas putida*.

⁷ La liofilización es un proceso de secado que se basa en sublimar el hielo de un producto congelado. El agua del producto pasa, por tanto, directamente de estado sólido a vapor sin pasar por el estado líquido, para lo cual se debe trabajar por debajo del punto triple del agua, 0.01 °C y 4.5 mmHg

Este proceso era posible debido a la altitud de las montañas (alturas superiores a los 3,000 metros), y por ello la desecación se realizaba a presiones atmosféricas reducidas.

De forma similar, las tribus indias de los Siux y Cree de América del Norte desecaban la carne de búfalo disponiéndola en tiras, para golpearlas y extenderlas al sol, a la vez que le agregaban ácido procedente de los zumos de moras y nueces⁸. Finalmente las sumergían en grasa. A esta carne seca le llamaban *pemmican*.

Es evidente que la preservación de los alimentos ha sido una actividad de vital importancia para las primeras civilizaciones, las cuales difícilmente hubieran podido sobrevivir sin este valioso recurso alimenticio. Los aztecas tampoco estaban exentos de esta actividad, ya que ponían a secar al sol semillas de calabaza, granos de maíz, pescado e incluso spirulina, la cual se solía recolectar en la superficie de los lagos con redes y pequeñas palas, extendiéndolas al sol para obtener pequeñas obleas rectangulares y ser comidas como condimento o acompañadas de tortillas.

⁸ El uso de los ácidos procedentes de las frutas servía como método de conservación, acidificación y ayudaba a la desecación.



Fig. 2.1.- Cultivo de spirulina por los Mexicas (Dibujo de Peter T. Furst; March 1978).

Con el paso del tiempo se fueron adaptando estos alimentos para ser usados en las misiones espaciales. Los aperitivos deshidratados estaban formados por pequeños cubos de aproximadamente 1 centímetro cúbico.

Por ejemplo, en el programa Gemini se acumularon 14 días de vuelo en el espacio, para los que se necesitó empacar 0.58 Kg/día de comida deshidratada por astronauta de la tripulación, repartiendo la comida en tres almuerzos.

Pese a que en el programa Apolo se introdujeron alimentos enlatados y envases flexibles, para el programa del Transbordador Espacial (1981 hasta 2011), se recurrió al antiguo sistema de alimentos deshidratados.

Las aplicaciones comerciales de esta tecnología han llegado a tal grado que en el mercado encontramos diferentes tipos de deshidratadores, así como una amplia variedad de alimentos deshidratados.

2.3 SECADORES UTILIZADOS EN LAS INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS

Como se ha visto, la deshidratación es la remoción de la actividad de agua presente en los alimentos, al eliminar el agua de los tejidos alimenticios se está quitando el medio sin el cual las bacterias, mohos y hongos no pueden proliferar, teniendo así un alimento duradero 100% libre de conservadores y sobre todo nutritivo.

Existen muchas maneras para lograr el cometido de la deshidratación, desde las maneras artesanales practicadas por nuestros antepasados, hasta las más modernas mediante el control de las características del secado para cada alimento.

El secado más sencillo es exponiendo los granos, carne, pescado, frutas, etc. a los rayos del Sol; El problema de este método son los factores que no se pueden controlar, como las lluvias, viento, roedores, polvo, entre otros, propiciando que la calidad del secado no sea del todo efectiva, ya que solo es posible extraer la humedad del alimento hasta dejarlo con un 15% de esta.



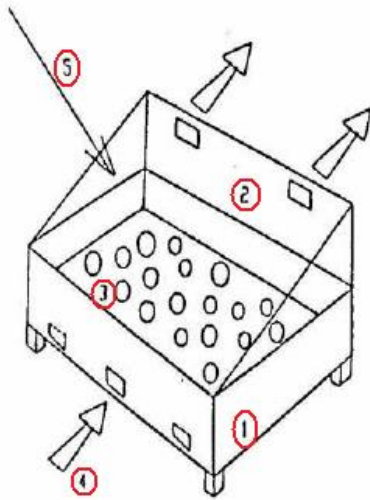
Fig. 2.2.- Extendido de café para su secado o tostado natural (altamiracafe.blogspot.mx, 2013).

Dentro de la industria agroalimentaria los secadores utilizados se clasifican en:

- Directos o por Convección.
- Indirectos
- Mixtos
- Híbridos

2.3.1 Secadores Solares Directos o por Convección natural

En estos secadores el aire se calienta en la misma cámara de secado, esto es posible ya que las caras contenedoras del producto que son transparentes, permiten el paso de luz solar, pero impiden la salida de la luz ultravioleta, generando un efecto invernadero, aumentando así la temperatura del aire que rodea al producto. En dicho contenedor se dispone una serie de orificios tanto en su base como en la parte superior de las caras, esto con la intención de generar un efecto convectivo, para tener una circulación natural del aire, de esta manera se calienta y seca el aire de manera simultánea.



- 1.- Gabinete o caja.
- 2.- Paredes transparentes, con orificios de salida para el aire caliente.
- 3.- Interior de la caja.
- 4.- Orificios para ingresar el aire.
- 5.- Pared con ángulo de inclinación para recibir la radiación solar perpendicular a su superficie.

Fig. 2.3.- Secador solar directo (Finck-Pastrana, 2013).

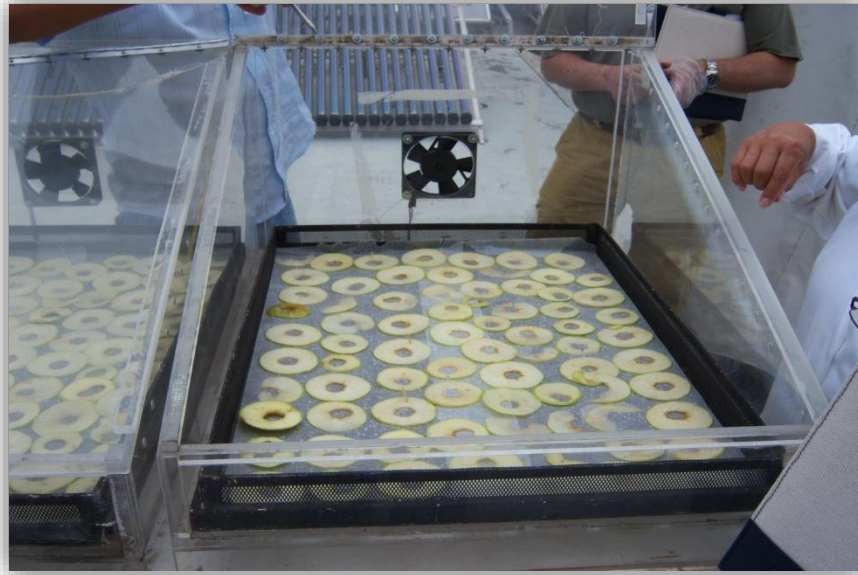
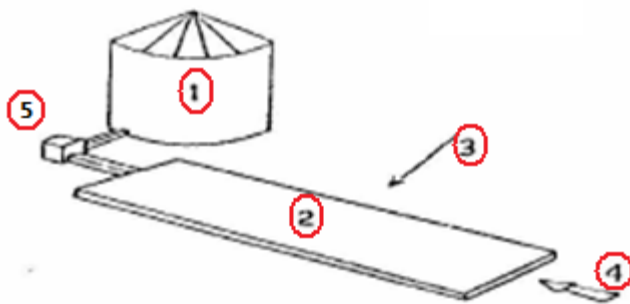


Fig. 2.4.- Deshidratadores directos en el IER (El autor, 2013).

2.3.2 Secadores Solares Indirectos

Estos secadores se componen de dos partes, la primera se le conoce como túnel de calefacción y la segunda es la cámara de secado, el túnel de calefacción está diseñado para calentar el aire con los rayos solares, utilizando el mismo fenómeno que el dispositivo anterior (efecto invernadero) y con el uso de un soplador se induce una corriente convectiva hacia la cámara de secado.



- 1.- Cámara de secado
- 2.- Túnel de calefacción
- 3.- Radiación solar
- 4.- Entrada de aire
- 5.- Soplador

Fig. 2.5.- Secador solar indirecto (Finck-Pastrana, 2013).

2.3.3 Secadores solares mixtos

Los dos conceptos anteriores se integran en un tercer tipo de equipo, llamado mixto o radiactivo-convectivo. Las charolas con el producto a deshidratar se disponen en una serie de pilas en una cámara transparente, elaborada con hule pvc especial para invernaderos o cualquier otro material que permita el paso de la luz solar, para calentar el aire y el alimento, mientras tanto en otra cámara se ingresa aire para ser secado, a la vez que unos sopladores dispuestos en la pared que divide las dos cámaras, ingresan el aire seco hacia la cámara de deshidratado.

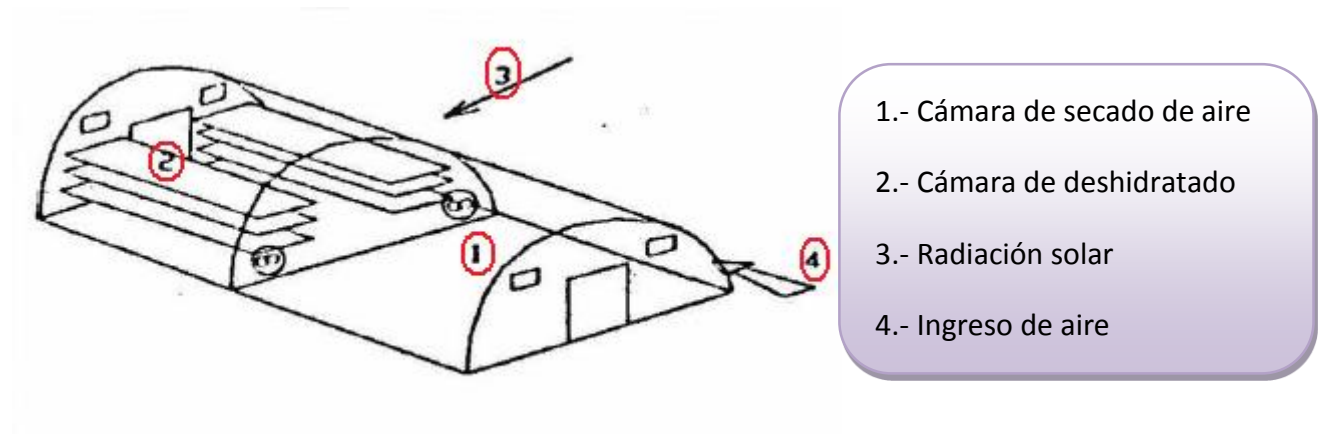


Fig. 2.6.- Secador de calentamiento mixto (Finck-Pastrana, 2013).

2.3.4 Secadores solares híbridos

Con los equipos anteriores, sólo se puede deshidratar mientras tengamos horas de sol, lo cual sin duda es un problema para aquellos alimentos que requieren un tiempo mayor a las horas promedio de sol por día, como es el caso del jitomate, pues el jitomate es uno de los alimentos con mayor actividad de agua y su tiempo de deshidratado es alrededor de 24 horas para 100 Kg de producto fresco, para resolver este problema se le agregó a un equipo de deshidratado solar directo o indirecto, calentadores solares de agua y un termo-tanque, con este sistema se puede continuar la deshidratación por la noche.



Fig. 2.7.- Secador de bandejas que trabaja con energía solar en el IER Temixco 2013 [IER].

2.4 PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN

La deshidratación de alimentos es un proceso en el que se invierte una gran cantidad energética, que requiere de 1,000 a 2,000 kJ por kilogramo de agua, la deshidratación implica la transferencia simultánea de calor y masa.

Este proceso no solo implica la evaporación paulatina del líquido contenido en los sólidos, sino que también potencializa los aportes nutritivos que se obtienen de estos al ser ingeridos. Es por ello que resulta importante monitorear todos los parámetros de operación dependiendo el tipo de alimento, pues es muy diferente el secado del coco, comparado con el del plátano por ejemplo; si el monitoreo no se hace, existe la probabilidad de dañar el alimento, disminuyéndole el aporte vitamínico, dando como resultado una simple masa orgánica, con buen color, probablemente buena textura, pero nada nutritiva.

Se suele usar de manera indistinta la palabra deshidratador y secador, un deshidratador puede ser también un secador, todo dependerá de la cantidad de agua con la que termine el producto al final del proceso. Se dice que un alimento está seco si al final del proceso posee una humedad entre 15-20%, pero un alimento se considerará deshidratado si la humedad contenida en su estructura está en el rango de 3-5%, sin embargo en este trabajo, pese a que ambas palabras no son sinónimo, se utilizarán de manera indiferente sólo por practicidad.

2.5 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA DESHIDRATACIÓN

En el proceso de deshidratación con aire caliente se aplican conceptos fundamentales de la termodinámica, como la teoría compleja de transferencia de calor y masa; para el diseño de estos dispositivos deshidratadores de alimentos, es necesario tener en cuenta las especificaciones térmicas que el alimento puede soportar, con la finalidad de optimizar el proceso de secado sin perder de vista las posibles pérdidas de nutrientes en los alimentos. En esta parte se describe la mayoría de los parámetros involucrados en el proceso de deshidratación con aire caliente y su relación entre ellos.

2.5.1 Aire

Acondicionar el aire es controlar su temperatura, humedad, distribución y pureza. Típicamente las aplicaciones de este proceso son el de procurar la comodidad de los ocupantes de residencias, teatros, escuelas, etc, o bien en la industria para mantener productos alimenticios, productos químicos, entre otros, bajo temperaturas controladas, sin embargo para el deshidratado de alimentos con aire seco será indispensable acudir a dicha teoría de acondicionamiento y hacer válido dicho proceso a este en particular.

Antes de estudiar el acondicionamiento del aire, es necesario conocer sus características y propiedades.

2.5.1.1 Composición

La atmósfera que rodea la Tierra es una mezcla de gases cuya composición es:

| | Volumen en % | Peso en % |
|------------------|--------------|-----------|
| Nitrógeno | 78.1 | 76.0 |
| Oxígeno | 20.9 | 23.1 |
| Argón | 1.0 | 0.9 |

Tabla 2-1.- Mezcla de gases que conforman la atmósfera; estos datos se refieren al aire seco, pero la humedad puede variar del 0% al 4% (Goribar, 1984).

El aire tiene muchas impurezas como gases, sólidos, polvos, etc, en ciertas proporciones que dependerán de varios factores, por ejemplo en lugares montañosos y en el mar el aire es más puro comparado con otras regiones.

El aire contiene por lo general:

| Impurezas | Gases en % |
|-------------------|-------------------------|
| Humos de sulfuros | Nitrógeno 78.03 |
| Humos de ácidos | Oxígeno 20.99 |
| CO ₂ | Argón 0.94 |
| Polvo | Bióxido de carbono 0.03 |
| Cenizas | Hidrógeno |
| Minerales | Xenón 0.01 |
| Vegetales | Kriptón |
| Microorganismos | Otros |

Tabla 2-2.- Composición típica del aire (Goribar, 1984).

2.5.1.2 Calor específico

El calor específico del aire no es constante sino que depende de la temperatura. Para fines prácticos se usa:

Calor específico a presión constante, a 25 °C y 1 atm:

$$C_p = 0.2415 \frac{Btu}{lb \text{ } ^\circ F} = 1.0111 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para fines que requieren precisión:

$$C_p = 0.24112 + 0.000009 T \frac{Btu}{lb \text{ } ^\circ F}$$

Donde T es la temperatura en °F; para convertir a $\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$ considerar que

$$1 \frac{Btu}{lb \text{ } ^\circ F} = 4.1868 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Calor específico a volumen constante a 25 °C y 1 atm:

$$C_v = 0.1714 \frac{Btu}{lb \text{ } ^\circ F} = 0.7176 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

2.5.1.3 Peso específico

Peso del aire seco:

$$1.2007 \frac{kg}{m^3} \text{ (a } 21 \text{ } ^\circ C \text{ y } 1 \text{ atm)}$$

Peso del aire seco contenido en un m³ de aire saturado:

$$1.1708 \frac{kg}{m^3} \text{ (a } 21 \text{ } ^\circ C \text{ y } 1 \text{ atm)}$$

Peso de la mezcla saturada:

$$1.1892 \frac{kg}{m^3} \text{ (a } 21 \text{ } ^\circ C \text{ y } 1 \text{ atm)}$$

2.5.1.4 Volumen específico

El volumen específico es el recíproco del peso específico, esto es:

$$v = \frac{1}{w}$$

Ecuación 2-1 Volumen específico

Para $t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P = 1\text{ atm}$

Aire seco:

$$v = \frac{1}{1.2007} = 0.8328 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Aire seco contenido en un m^3 de aire saturado:

$$v = \frac{1}{1.1708} = 0.8541 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Peso de la mezcla saturada:

$$v = \frac{1}{1.1892} = 0.8409 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

2.5.1.5 Entalpía del aire atmosférico.

Con el objetivo de realizar los balances energéticos en los procesos que involucran evaporación de agua debido a la presión de vapor, se debe conocer la entalpía de aire atmosférico que es igual a la suma de la entalpía del aire seco más la entalpía del vapor de agua.

$$H = H_a + H_v \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Ecuación 2-2 Entalpía de aire atmosférico

$$H_v = H_g = 2500.9 + 1.82T_{amb} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Ecuación 2-3 Entalpía de vapor

2.6 HUMEDAD ABSOLUTA Y HUMEDAD RELATIVA

Al cociente dado por la masa de vapor de agua contenida en el aire entre la masa de aire seco se conoce como humedad absoluta; el aire atmosférico puede contener sola una máxima cantidad de vapor de agua, la humedad relativa es el cociente entre la masa de vapor de agua contenida entre la máxima que puede contener. De este modo el valor de la humedad relativa en el aire es un parámetro de gran utilidad en la deshidratación, que dependerá de la temperatura del aire, esto es mientras mayor sea la temperatura menor será la humedad relativa, es decir el aire podrá absorber más humedad.

HR: Humedad relativa (%)

ω : Humedad absoluta (kg vapor/kg aire seco)

2.7 TEMPERATURA DE ROCIO

La temperatura de rocío indica la cantidad de humedad contenida en el aire, igualmente indica la temperatura a la cual el aire se satura cuando se enfría. Si se disminuye la temperatura del aire atmosférico aumenta su humedad relativa y al alcanzar el 100% de humedad relativa, cualquier decremento en la temperatura ocasionará una condensación de vapor de agua para mantener la condición de aire saturado. Esta es igual a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de vapor.



Fig. 2.8.- El agua contenida en el aire alrededor del vaso se condensa al enfriarse lo suficiente hasta alcanzar su temperatura de rocío.

2.8 ACTIVIDAD DE AGUA

Este compuesto es vital para el desarrollo de los procesos biológicos que se efectúan en la Tierra, como condiciones climáticas, cambios en los sistemas ecológicos y desarrollo de los seres vivos y microorganismos.

Sabemos que el agua es el principal componente de los alimentos y que pese a que podemos tener diferentes alimentos con la misma cantidad de agua en su estructura, no se comportarán de la misma manera ya que depende mucho el tipo de enlaces bajo los que se presente el vital líquido.

La A_w es algunas veces definido como “agua libre”, esto quiere decir, agua no enlazada y que está disponible en el sistema. Cierta fracción del contenido de agua en los alimentos está ligada por enlaces químicos a sitios específicos con grupos como hidroxil de polisacáridos, carbonil o amino de proteínas, entre otros sitios polares⁹.

Prácticamente en los procesos de deshidratación se busca eliminar una parte o la totalidad del “agua libre”, transformándola en “no disponible” contribuyendo a prolongar la vida de anaquel del producto deshidratado.

Para determinar la cantidad de agua movilizada, se determina la actividad de agua conjuntamente con el registro de contenido de humedad. El principal objetivo del secado es decrementar la A_w de los materiales perecederos a valores inferiores de 0.5.

La actividad de agua es un concepto muy importante en la industria de los alimentos, debido a que su control permite la supresión del crecimiento microbiano, la velocidad de reacción de los procesos químicos y la inhibición del deterioro enzimático¹⁰, controlando así la vida media de los alimentos.

⁹ La polaridad química o solo polaridad es una propiedad de las moléculas que representan la separación de las cargas eléctricas en la misma. Esta propiedad está íntimamente relacionada con otras propiedades como la solubilidad, el punto de fusión, el punto de ebullición, las fuerzas intermoleculares, entre otras.

¹⁰ La gráfica muestra la velocidad de degradación del alimento respecto a su actividad de agua; cuando tenemos oxidación de los lípidos será notado por su sabor amargo, el pardeamiento no enzimático oscurece la superficie del producto.

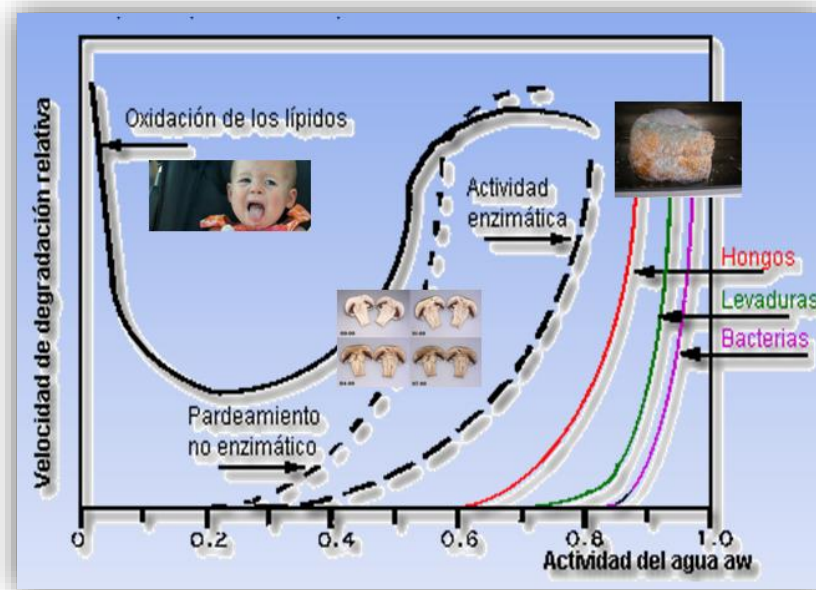


Fig. 2.9.- Actividad de agua vs Velocidad de degradación relativa (Lagunas, 2013).

Basado en conceptos termodinámicos, la actividad de agua sirve como índice de cómo se está controlando el comportamiento del agua en un sistema-alimento. Este parámetro controla la fuerza impulsora en operaciones de remoción de agua y es por lo tanto esencial para propósitos de diseño. En otras palabras es la cantidad de moléculas de agua en un espacio alrededor del alimento cuando este es confinado en un recinto herméticamente cerrado, expresando la medida como referencia del agua pura. Es entonces una medida de la humedad relativa (HR) que se da en el sistema cerrado, cuando este está en equilibrio.

$$A_w = \frac{P}{P_0} = \frac{HR}{100}$$

Ecuación 2-4 Actividad de agua

Como la presión parcial de vapor del agua dentro del alimento es inferior o igual a la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, la actividad de agua está comprendida entre cero y uno.

2.9 AGUA LIGADA

En los tejidos animal y vegetal, el agua no está distribuida uniformemente, debido a las diversas estructuras internas propias de cada tejido, como los microcapilares que se forman, así como la presencia de lípidos que no permiten la coexistencia del agua a sus alrededores, debido a su incompatibilidad, entre otros. Por esta razón, en los alimentos

existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua, es decir, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas. Lo anterior es verificable en las diversas temperaturas de congelamiento que se observan en los alimentos, en general un alimento se congela a -20°C , pero aún en estas condiciones una fracción del agua permanece líquida y requiere de temperaturas más bajas, por ejemplo -40°C , para que solidifique completamente.

Este tipo de consideraciones ha llevado a que se empleen términos como agua ligada. Técnicamente se puede decir que el agua ligada es aquella porción que no congela a 20°C , por lo que también se le llama agua no congelable.

Dicho de otra forma el agua ligada es aquella que está fuertemente unida a la estructura del alimento mediante enlaces químicos.

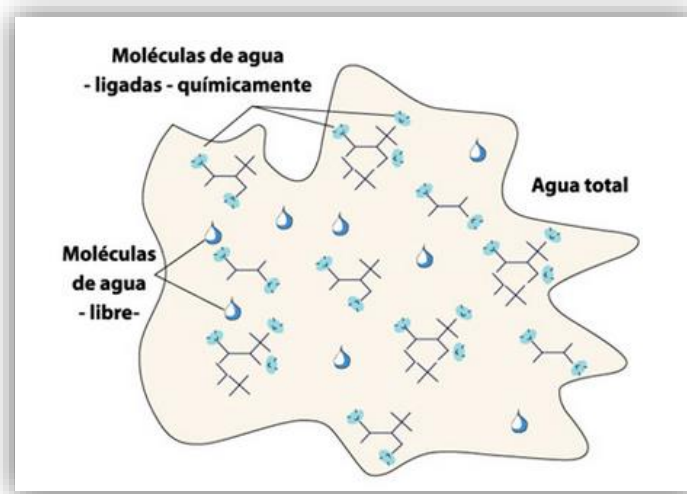


Fig. 2.10.- Agua total, libre y ligada (avibert.blogspot.com).

2.10 PRESIÓN DE VAPOR

Para explicar este término, el cual pudiera ser un poco confuso, comenzaré con el siguiente ejemplo.

Se supone un líquido confinado en un recipiente hermético al que se le aplicará energía calorífica con la intención de romper las fuerzas intermoleculares del líquido que contiene, propiciando la separación de las moléculas de agua para llevar a la sustancia a una fase gaseosa por evaporación; se observará que bajo una condición de temperatura y presión,

existe un número determinado de moléculas de líquido que se integraron a la fase vapor (N_v) y que por choques entre moléculas y las paredes del recipiente existe otro número determinado de moléculas de vapor que se condensan (N_L) y regresan a su fase líquida.

Durante el proceso de evaporación, el número de moléculas de líquido presentes en el gas irá en aumento y cuando se alcanza constancia en las condiciones de temperatura y presión se obtiene un equilibrio dinámico. Este equilibrio se obtiene para cada temperatura y presión.

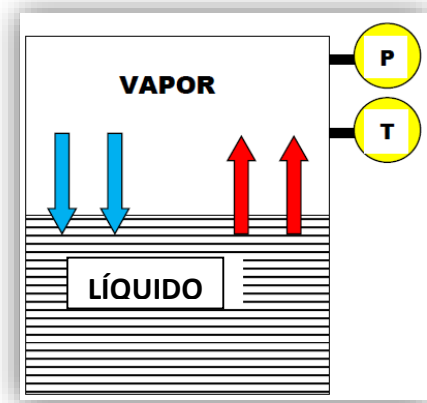


Fig. 2.11.- El número de moléculas que salen del líquido por evaporación es igual al número de moléculas que entran por condensación (Figueroa, 2013).

La cantidad de moléculas de agua en el gas se puede medir por la presión que ejerce a una temperatura determinada. Esta presión es conocida como presión de vapor (P_v)

Extrapolando esto a los alimentos, tenemos que el agua en un alimento ejerce una presión de vapor. La cantidad de presión del vapor depende de la cantidad de agua presente, la temperatura y la concentración de los solutos disueltos en el agua.

El aire atmosférico puede considerarse como un gas ideal, y por tanto la presión total en el aire puede considerarse como la suma de la presión ejercida por el aire seco más la presión de la masa de vapor. La presión de vapor que ejerce el aire atmosférico es igual a la humedad relativa del aire por la presión de saturación del agua a la temperatura del aire.

$$P_v = (HR)(P_{sat}|_T)$$

Ecuación 2-5 Presión de vapor

Considerando el aire atmosférico como un gas ideal, se tienen las relaciones para la humedad relativa y absoluta en términos de la presión de vapor

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P_{atm} - P_v}$$

Ecuación 2-6 Humedad absoluta

$$HR = \frac{\omega P_{atm}}{0.622 + \omega P_{sat}|_T}$$

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}|_T}$$

Ecuación 2-7 Humedad relativa

2.11 HUMEDAD EN EQUILIBRIO DINÁMICO

Cuando un alimento con muy poca humedad (ejemplo polvos) se coloca en un lugar con una humedad relativa de 60%, el alimento toma agua del aire que hay a su alrededor, para alcanzar el equilibrio con el aire y se humedece, cuando el equilibrio sea alcanzado el alimento tendrá una actividad de agua de 0.6; por otra parte si el alimento es el que tiene una mayor actividad de agua y se expone a un ambiente cuya humedad relativa es menor, lo que sucederá es que el alimento cederá agua al medio hasta que el equilibrio sea alcanzado. La humedad alcanzada, una vez que se ha logrado el equilibrio, es llamada “Humedad en equilibrio dinámico”, ya que el flujo de moléculas del agua del medio al alimento y viceversa es un intercambio dinámico.

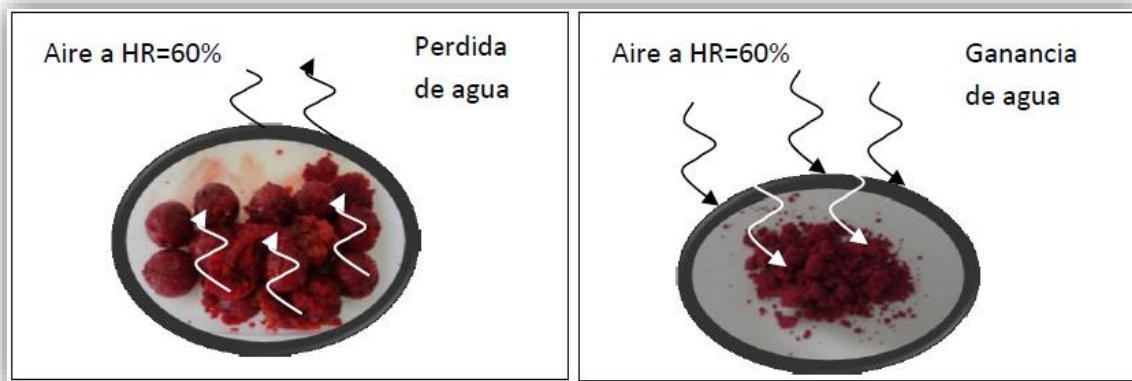


Fig. 2.12.- La naturaleza busca equilibrar las presiones de vapor del alimento y el medio; $A_w = 0.6$ (Lagunas, 2013).

2.12 HUMEDAD DEL ALIMENTO

Como se ha mencionado, la cantidad de agua en los alimentos depende del tipo, la forma y textura. Esta humedad puede expresarse en base húmeda o en base seca.

2.12.1 Humedad base húmeda

Para medir el contenido de agua de un alimento se puede hacer con la siguiente relación:

$$H_{bh} = \frac{m_a}{m_a + m_s} = \frac{m_a}{m_t}$$

Ecuación 2-8 Humedad del alimento base húmeda

La ecuación anterior nos relaciona la cantidad de agua perdida respecto a todo el sistema.

2.12.2 Humedad base seca

Por otra parte suele encontrarse en la literatura la humedad de algún alimento expresada en base seca:

$$H_{bs} = \frac{m_a}{m_s}$$

Ecuación 2-9 Humedad del alimento base seca

Esto es, la humedad perdida respecto a la muestra completamente seca o deshidratada.

En el comercio y la industria se emplea mayormente el contenido de humedad con base húmeda, mientras que en trabajos de laboratorio el contenido de humedad con base seca resulta más adecuado. Resulta muy sencillo relacionar un contenido con el otro.

$$H_{bh} = \frac{H_{bs}}{H_{bs} + 1}$$

Ecuación 2-10 Humedad base húmeda en función de la humedad base seca

$$H_{bs} = \frac{H_{bh}}{1 - H_{bh}}$$

Ecuación 2-11 Humedad base seca en función de la humedad base húmeda

La siguiente tabla representa la relación entre los valores de H_{bh} y los de H_{bs} . Para bajos contenidos de humedad ambos coinciden.

| Hbh % | Hbs % | Hbh % | Hbs % | Hbh % | Hbs % |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0 | 0.000 | 10 | 0.111 | 20 | 0.250 |
| 1 | 0.010 | 11 | 0.123 | 21 | 0.428 |
| 2 | 0.020 | 12 | 0.136 | 22 | 0.666 |
| 3 | 0.030 | 13 | 0.490 | 23 | 1.000 |
| 4 | 0.041 | 14 | 0.162 | 24 | 1.500 |
| 5 | 0.052 | 15 | 0.176 | 25 | 2.330 |
| 6 | 0.063 | 16 | 0.190 | 26 | 4.000 |
| 7 | 0.075 | 17 | 0.204 | 27 | 9.000 |
| 8 | 0.086 | 18 | 0.219 | 28 | 19.000 |
| 9 | 0.098 | 19 | 0.234 | 29 | ∞ |

Tabla 2-3 Relación entre los valores de humedad en base húmeda y humedad en base seca.

Por otra parte, si se desea conocer la cantidad de sólidos que hay en un alimento, puede determinarse con las siguientes ecuaciones:

$$\%sólido\ seco = \frac{100}{H_{bs} + 1}$$

Ecuación 2-12 Porcentaje de sólido seco

$$\%agua = \frac{100H_{bs}}{H_{bs} - 1}$$

Ecuación 2-13 Porcentaje de agua

2.12.3 Consumo específico de energía

El consumo energético en un secador variará conforme a las diferentes etapas de secado. Para fines prácticos dicho consumo energético se expresará como cantidad de kilojoules consumidos por kg de agua evaporada, ya que permite la intercomparación entre diferentes secadores y se conoce como “consumo específico energético”.

Por ejemplo, un secador bien construido y con buen mantenimiento, se considera que tendrá un consumo energético aproximado de 4,186 kJ/kg de agua evaporada, esta energía

comprende el calor necesario para la evaporación del agua en el producto y las pérdidas térmicas. En la tabla 2.4 se presentan el desglose energético.

| Desglose energético | kJ |
|---|--------|
| Energía para evaporar 1 kg de agua | 2,511 |
| Pérdida por calor sensible absorbido por el aire | 1,250- |
| | 1,340 |
| Pérdida de calor por convección, radiación y conducción | 124 |
| Pérdida por el calor transportado por el grano | 334 |
| TOTAL | 4,219- |
| | 4,309 |

Tabla 2-4 Consumo energético promedio en un secador vertical

El valor de 2,511 kJ/kg de agua, es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua, dicho calor no se puede reducir; en general las pérdidas térmicas pueden disminuir si se moja el rendimiento térmico del secador. Con fines prácticos para un cálculo estimativo, se pueden tomar los datos de la tabla 2.4. En caso de las pérdidas térmicas debido a la combustión, estas pueden llegar hasta un 50%, dependiendo del tipo de combustible y la eficiencia del quemador. Las otras pérdidas pueden reducirse si el proceso se hace más eficiente.

Para evaluar el consumo específico de energía puede realizarse de la siguiente forma:

La cantidad de material húmedo que entra al secador es:

$$M^* = \frac{100 - H_{fin}}{100 - H_{ini}} M \text{ (t/h)}$$

Ecuación 2-14 Masa de material húmedo

En donde M (t/h) es la producción de producto seco por otra parte H_{ini} y H_{fin} son humedades inicial y final del material en el proceso de secado, respectivamente.

Mientras que la capacidad de evaporación está dada por:

$$M_{ev} = M^* - M \text{ (t de agua/h)}$$

Ecuación 2-15 Masa evaporada

El consumo específico de energía va creciendo cuando el material que ingresa al secador tiene menor porcentaje de humedad, Existe la posibilidad de tener un mayor consumo

energético en un producto cuya humedad inicial es menor, respecto a un producto cuya humedad inicial es mayor. Esta disminución en la eficiencia se deduce a que es más difícil extraer el agua del material menos húmedo porque está más fuertemente ligada a la propia estructura.

2.13 PROCESOS PSICOMÉTRICOS

2.13.1 Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo

Temperatura de bulbo seco. La temperatura de bulbo seco es la que se mide con un termómetro ordinario, y es la medida del calor sensible del aire expresado en grados Fahrenheit o centígrados.

Temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo indica la cantidad de energía térmica contenida en el aire y está expresado en grados Fahrenheit o Centígrados. Se determina cubriendo el bulbo de un termómetro con franela o con un trapo húmedo y haciendo pasar aire rápidamente; en esta forma la humedad comienza a evaporarse. La temperatura del agua y del aire circundante baja proporcionalmente a la evaporación ocurrida.

Si está seco el aire que rodea al termómetro, la evaporación es rápida y el descenso de temperatura es grande (relativamente). Por el contrario si el aire está muy húmedo, la evaporación es lenta y, por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el bulbo seco y el húmedo será pequeña. Si el aire está saturado, no habrá evaporación ni bajará la temperatura.

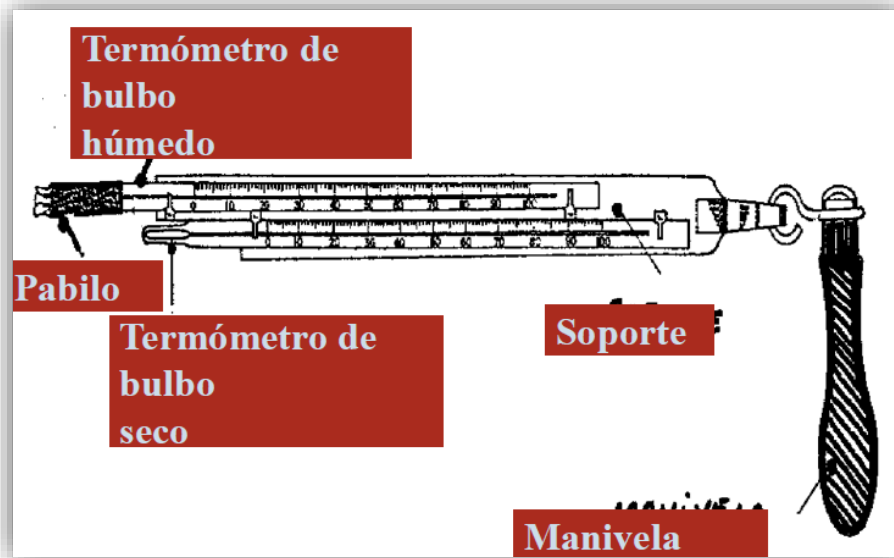


Fig. 2.13.- Psicrómetro (Figueroa, 2013).

2.13.2 Leyes Psicrométricas

1. Cuando el aire seco se satura adiabáticamente, la temperatura se reduce y la humedad relativa se incrementa, la reducción de calor sensible es igual al incremento simultáneo de calor latente.
2. Cuando el contenido de humedad del aire se incrementa adiabáticamente, la temperatura se reduce simultáneamente hasta que la presión de vapor corresponde a la temperatura de saturación. Esta se llama “temperatura de saturación adiabática”
3. Cuando cierta cantidad de agua aislada se evapora, se supone que la temperatura final será la adiabática de saturación y no está afectada por convección, por lo que la temperatura de bulbo húmedo será la adiabática de saturación.
4. La temperatura de bulbo húmedo del aire depende sólo del calor total sensible y latente y es independiente de sus proporciones relativas. En otras palabras, la temperatura de bulbo húmedo es constante ya que el calor también lo es.

2.13.3 Carta psicrométrica

La carta psicrométrica es una representación gráfica con la que se puede analizar gráficamente las propiedades psicrométricas y se facilita la solución de diferentes problemas.

La carta muestra básicamente la relación entre las cinco siguientes propiedades del aire:

- Temperatura del bulbo húmedo.
- Temperatura de rocío.
- Temperatura de bulbo seco.
- Humedad relativa.
- Humedad específica.

Cuando se conocen dos de estas propiedades, las demás se encuentran con facilidad.

La carta parte de la línea de saturación, o sea, a cada temperatura de bulbo seco corresponde cierta cantidad de humedad para que haya saturación; por lo tanto, si en las abscisas se representan las temperaturas y en las ordenadas las humedades específicas, la línea de saturación tiene la forma mostrada en la siguiente figura.

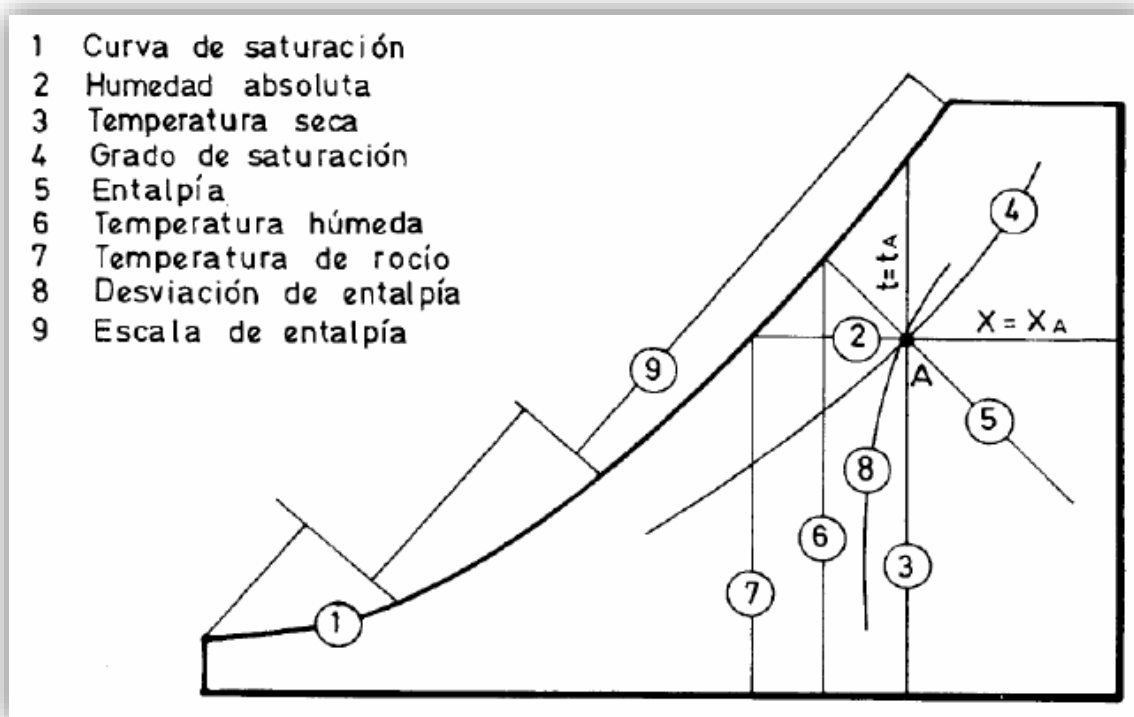


Fig. 2.14.- Esquema del diagrama de Carrier, también conocido como carta Psicrométrica (Pérez., 2007).

2.14 ISOTERMAS DE SORCIÓN

Una de las formas más habituales de representar el equilibrio de adsorción¹¹ es mediante la relación entre la cantidad adsorbida y la presión, para una temperatura determinada. Esta relación se conoce como isoterma de adsorción¹² para un determinado sistema adsorbato-adsorbente¹³.

¹¹ Dicho equilibrio es el que anteriormente se definió como “humedad en equilibrio dinámico”.

¹² El proceso de adsorción es considerado uno de los fenómenos naturales de superficie más relevantes de la actividad humana. Es por medio de la adsorción que se logra el control de emisiones de contaminantes al ambiente; la refrigeración por adsorción mediante energía solar o combustibles no convencionales y para el almacenamiento de sustancias como el hidrógeno y metano, entre otras.

La teoría sobre el fenómeno de adsorción fue desarrollada por Langmuir. La adsorción puede ser dividida en dos: la adsorción química (irreversible o quimisorción) y la física (fisorción), debido a los enlaces que se formen entre el adsorbato y la superficie del adsorbente. Para distinguir entre ambos conceptos se dice que la adsorción química es un proceso **absortivo** (enlaces iónicos o covalentes); la fisorción es un proceso **adsortivo** (fuerzas de Van der Waals y dipolares) o simplemente **sortivo**. De manera sencilla puede decirse que un proceso de **absorción** implica un cambio de volumen del sistema involucrado, pero un proceso **sortivo** sólo se desarrolla en las fronteras del sistema. El desecado de un alimento se considera un proceso **sortivo**. (Cortés, 2013)

¹³ **Adsorbato:** Sustancia que se pega (adsorbe) en la superficie.

Adsorbente: Superficie sobre la que sucede la adsorción

La isoterma de adsorción es clasificada en seis formas. Dependiendo de la forma de la curva se puede inferir acerca de la distribución de poros del material y/o de la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, clasificándose de la siguiente manera¹⁴.

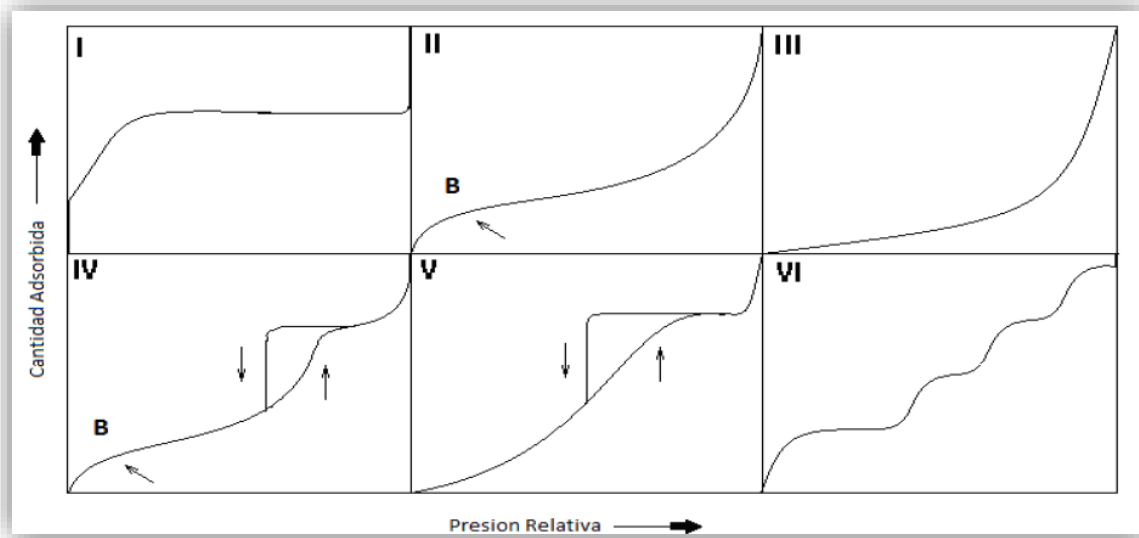


Fig. 2.15.- Clasificación de las isotermas según la IUPAC (Cortés, 2013).

- I. Isotherma de Langmuir Materiales microporosos¹⁵.
- II. Materiales no porosos.
- III. Este tipo de isoterma se presenta en materiales no porosos o macroporosos cuando existe poca afinidad entre el adsorbente.
- IV. La isoterma del tipo IV presenta un ciclo de histéresis, el cual se asocia con la condensación capilar propia de la adsorción/desorción en mesoporos, y un valor límite en la cantidad adsorbida para el intervalo superior de presión relativa. La parte inicial de la isoterma se atribuye a la adsorción en monocapa¹⁶, puesto que coincide con la primera región de la isoterma de tipo II. Este tipo de isoterma se presenta en los materiales adsorbentes mesoporosos.
- V. Se presenta en materiales mesoporosos debido a la presencia de histéresis en el proceso. Existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Esta isoterma es muy poco frecuente.

¹⁴ Está clasificación fue propuesta por Brunauer y sus colaboradores en 1938 y en la actualidad es la recomendada por la *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC)

¹⁵ **Microporoso:** Poros con diámetro < 2nm

Mesoporoso: Poros con diámetro de 2-50nm

Macroporoso: Poros con diámetro > 50nm

¹⁶ Una monocapa es una sola capa de átomos o moléculas estrechamente empaquetados. Para efecto del proceso de secado se habla de una monocapa formada por moléculas de agua.

VI. Esta isoterma representa la adsorción escalonada en multicapa sobre una superficie uniforme no porosa. Cada uno de los escalones que presenta corresponde a una capa adsorbida. Suele presentarse por ejemplo, en la adsorción de Argón a la temperatura del nitrógeno líquido (77 K) sobre negro de humo grafitizado.

Sin embargo, los perfiles de isotermas más frecuentes en alimentos son los tipos III y IV.

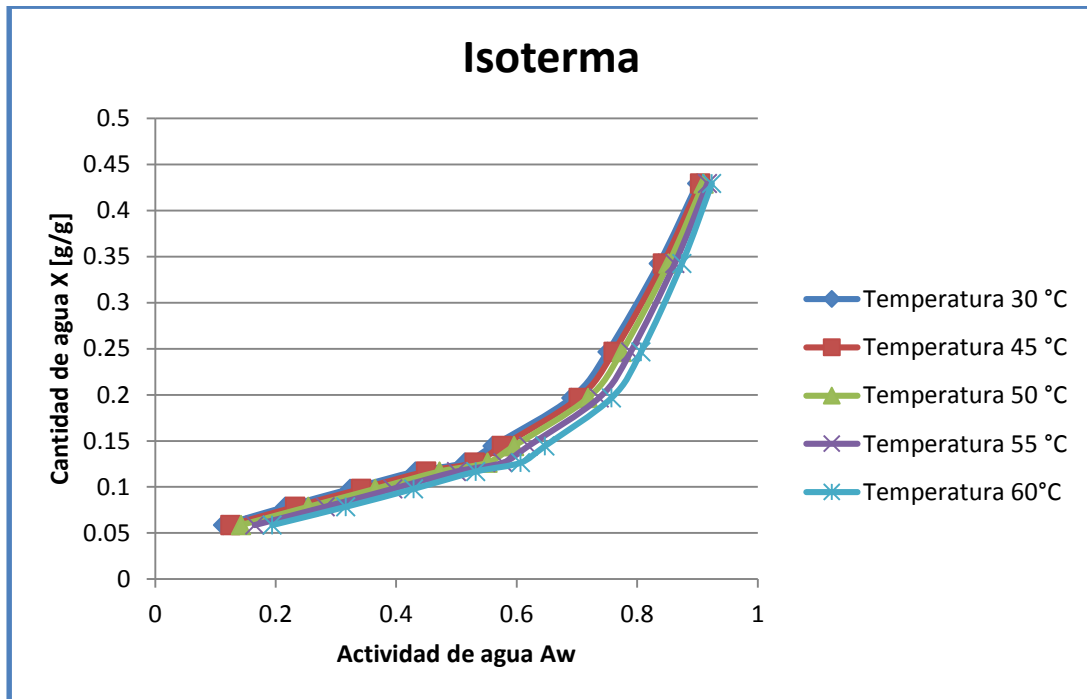


Fig. 2.16.- Curvas isotérmicas para papas (El autor).

2.15 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

2.15.1 Transferencia de calor

Como se ha visto, el proceso de secado es un proceso termodinámico, el cual implica tener bien presentes los balances energéticos y de masa. Mucha de la teoría de la deshidratación se basa en la transferencia de calor del aire al alimento fresco (húmedo) y la transferencia de masa (agua evaporada) del alimento al aire seco. Debe contemplarse la superficie de transferencia de calor para que se lleve a cabo de la manera más eficiente dicho fenómeno termodinámico.

Es evidente que para secar un producto se requiere calor para evaporar el agua que contiene. El calor latente de vaporización (L), es la energía necesaria para evaporar 1 kg de agua, el cual depende de la temperatura y es del orden de 2,450 kJ/kg. Esa misma cantidad de calor se obtiene cuando se condensa 1 Kg de vapor. Si el agua no está libre, como ocurre usualmente en los alimentos, el calor latente de vaporización es mayor y además de la temperatura depende del contenido de humedad.

$$Q_L = MaL$$

Ecuación 2-16 Calor latente

La transferencia de calor de un fluido en movimiento, como el aire, se conoce como convección, y está en función del área de transferencia de calor, la diferencia de temperaturas entre la temperatura media del aire y la temperatura de la superficie; y un coeficiente de transferencia de calor, este último es el parámetro más complejo y es difícil de determinar, pero su principal dependencia está en la velocidad del aire. El calor transmitido por unidad de tiempo es entonces:

$$\dot{Q} = h_c * A * (T - T_s)$$

Ecuación 2-17 Energía térmica transmitida

Para la h_c se deben calcular los números adimensionales de Reynolds, Nusselt y Prandtl, pero existe una correlación desarrollada para aire fluyendo a lo largo de bandejas planas:

$$h_c = 0.0204G^{0.8}$$

Ecuación 2-18 Correlación para calcular un coeficiente de transferencia de calor por conducción para flujo de aire sobre charolas planas

2.15.2 Transferencia de masa

En el proceso de secado se supone que toda el agua que sale del producto pasa al aire, entonces sucede que la disminución de agua en el producto es igual al aumento del agua en el aire:

$$m_a = m_s \Delta H_{bs} = m_{air} \Delta X$$

Ecuación 2-19 Masa de agua transferida del alimento al aire

Para la transferencia de masa a través del alimento se utiliza la segunda ley de Fick, que relaciona el cambio de humedad en el tiempo con la distribución de la concentración de la humedad en el alimento:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \left(\frac{j}{r} \right) \frac{\partial C}{\partial r} \right)$$

Para una placa plana, como lo es una bandeja, $j=0$, también $C=x$ y r se considera lineal al espesor como una z

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D * \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right)$$

Para las condiciones de humedad inicial y humedad final de equilibrio, y definiendo un espesor $z=r$ y una temperatura constante, la solución es:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D * t}{4z^2}}$$

Si el espesor z es muy pequeño y el tiempo es largo, todos los términos de la serie mayores a $n=1$ se deprecian, y si además se considera a $x_e = 0$.

$$\ln \left(\frac{x}{x_0} \right) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \pi^2 D * \left(\frac{t}{z^2} \right)$$

Y se tiene una relación entre la humedad en el alimento y el tiempo de deshidratación, D se obtiene experimentalmente al graficar los valores de $\ln \left(\frac{x}{x_0} \right)$ contra t o contra t/z^2 , ó en la literatura para el producto.

2.15.3 Balance de energía.

Para establecer el balance de energía hay que establecer una serie de suposiciones:

- Se considerará un proceso isotérmico y la temperatura del termómetro húmedo permanece constante durante el proceso de secado. Esto significa que la variación de entalpía específica será muy pequeña y positiva, pero no exactamente cero (como sería si el proceso fuese estrictamente isoentálpico).
- La mayor parte de la energía que aporta el aire se emplea en la evaporación del agua contenida en el sólido. Esto quiere decir, que se supone que el producto a secar se mantiene siempre, o al menos cuando la velocidad de secado es constante, a la temperatura del termómetro húmedo del aire, T_h .

Con las condiciones anteriores debe cumplirse el siguiente balance de energía.

$$m_a(\Delta h_2^* - \Delta h_1^*) \approx m_s \Delta H_{bs} c_{agua}(T_h) T_h$$

Donde $(\Delta h_2^* - \Delta h_1^*)$ es la variación de entalpía específica que sufre el aire, $m_s \Delta H_{bs}$ es el agua evaporada del sólido e incorporada al aire, y $c_{agua}(T_h)$ es el calor específico del agua líquida a la temperatura del termómetro húmedo.

Al utilizar la carta psicrométrica, en donde el proceso de secado sigue la línea de T_h constante, la operación se facilita ya que los términos del balance de energía pueden ser determinados una vez que se conocen los del balance de masa. Así, si se utiliza el diagrama psicrométrico, y se obtiene el calor específico del agua, no es necesario resolver el sistema de ecuaciones al suponer que el sólido a secar no cambia su temperatura durante el secado y que ésta es precisamente T_h .

Con lo anterior se puede definir un rendimiento térmico del proceso de secado, R_t como el cociente (en %) entre el calor necesario para la vaporización del agua contenida en el producto a una temperatura aproximadamente igual a la del termómetro húmedo, y la entalpía del aire al comienzo del proceso de secado.

$$R_t = \frac{m_w L_v(T_h)}{m_a \Delta h_1^*}$$

Ecuación 2-20 Rendimiento térmico del proceso

El rendimiento es indicador del porcentaje de la energía inicial del aire que ha sido empleada para eliminar el agua y suele situarse en un dominio entre un 40% y 60%.

2.16 PRIMERA CURVA DE SECADO

Es indispensable contemplar las características de los alimentos que se someterán al proceso de secado, por ejemplo: humedad de equilibrio, sensibilidad de material a la temperatura y los límites de temperatura alcanzable con la fuente de calor en particular. El comportamiento de secado de los sólidos puede ser caracterizado por la medición de la pérdida de contenido de humedad como una función de tiempo. Los métodos utilizados son por diferencia de humedad, pesado continuo, y pesado intermitente, con esta información es posible obtener una gráfica que describe la relación entre el tiempo de secado y la humedad perdida en el proceso.

Lo anterior se denomina cinética de secado; las cantidades de agua evaporada en el tiempo dependerán de la transferencia de calor y de masa entre la superficie del cuerpo y el medio ambiente del entorno. Si la curva se normaliza con la tasa inicial de secado y el contenido medio de humedad, todas las curvas pueden ser aproximadas a menudo a una sola curva característica de una sustancia en particular, esta es la “curva característica de secado”.

La eficacia de dicho proceso (pérdida de humedad en el mayor tiempo posible) está relacionado con los parámetros más importantes a estudiar; temperatura, velocidad del aire, humedad relativa del aire de secado, presión del sistema, etc.

A los procesos convectivos, que como mencionamos serán los de nuestro interés, los podemos dividir en dos etapas:

La primera etapa se denomina velocidad constante, ya que la pérdida de humedad respecto al tiempo es casi inversamente proporcional a la del tiempo de secado. En la segunda etapa la tasa de variación de la humedad respecto al tiempo disminuye, esto quiere decir que la rapidez con la que pierde humedad el sólido se ha retardado debido a que la estructura colapsa y es más difícil el paso del agua a través de los tejidos celulares.

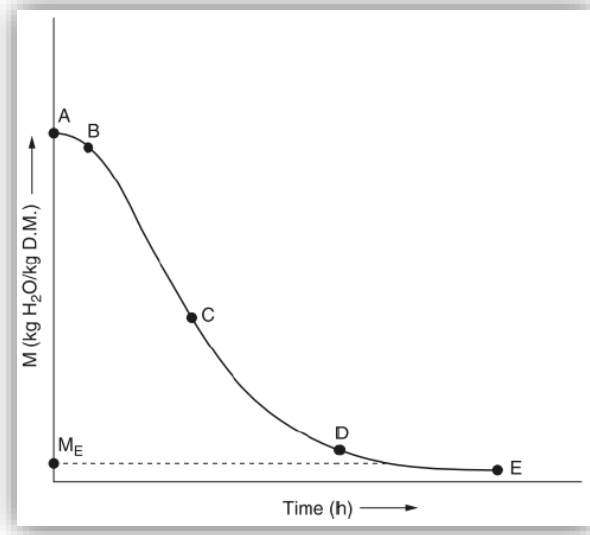


Fig. 2.17.- El segmento AB representa el período de estado no estacionario o calentamiento inicial, el segmento BC representa el período de velocidad constante, el segmento DE representa el período de velocidad decreciente (Vidaña, 2013).

2.17 SEGUNDA CURVA DE SECADO

Ahora bien, si graficamos la velocidad de secado respecto a la humedad del alimento, obtendremos el siguiente gráfico técnicamente en la segunda etapa de periodo de velocidad decreciente, veremos que se divide en dos etapas; la primera está dada por la sección CD, donde se observa que la rapidez con la que se humecta la superficie con la humedad del interior del alimento es mucho menor a la rapidez con la que se evapora la humedad superficial del sólido. En la sección DE (segunda etapa de velocidad decreciente), la humedad unida por sorción se elimina, a medida que la concentración de humedad se reduce por el secado, la tasa de movimiento interno de la humedad disminuye. La presión de vapor del alimento será igual a la presión parcial de vapor del aire de secado, y no se llevará a cabo un secado adicional.

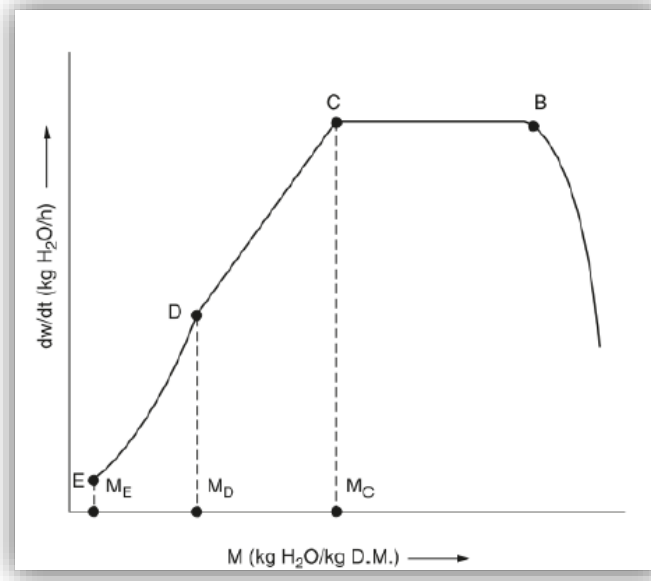


Fig. 2.18.- Velocidad de secado en función de la humedad del alimento; MC es el contenido de humedad crítico; ME es el contenido de humedad de equilibrio (Vidaña, 2013).

El mecanismo de eliminación de agua en tejidos animales y vegetales, es un fenómeno complejo en la que influyen fuerzas capilares, difusión del líquido debido a gradientes de concentración. La naturaleza del material puede cambiar en sus propiedades físicas y químicas durante el secado.

Cuando el alimento está fresco, el diámetro de los poros superficiales y de los capilares disminuye por influencia de la tensión superficial y los elementos sufren deformación y encogimiento.

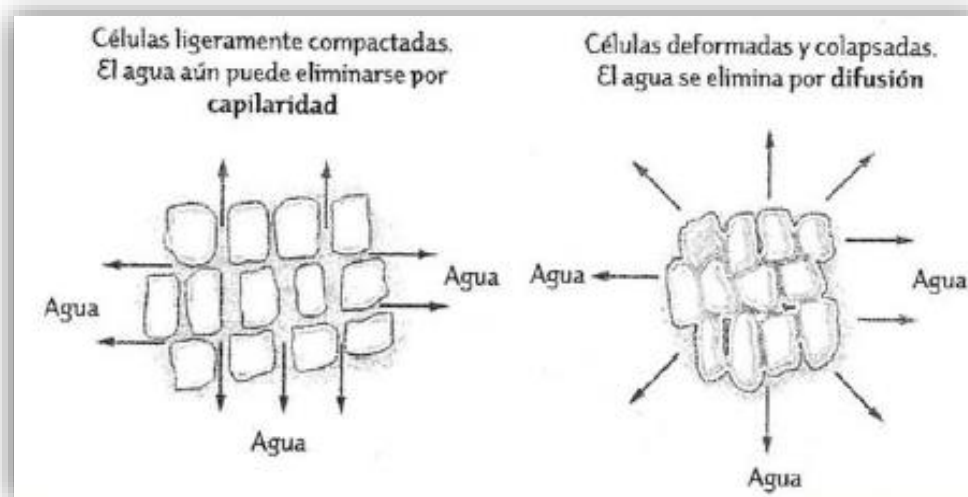


Fig. 2.19.- Colapso de la estructura capilar celular (Vidaña, 2013).

2.18 VELOCIDAD DE SECADO

Velocidad de secado es la rapidez con la que se extrae al agua del alimento por el aire seco, es decir, por la razón a la cual disminuye la humedad del alimento, como se ha mencionado dicho proceso típicamente se divide en dos periodos, secado a velocidad constante y secado a velocidad decreciente.

Podemos expresar dicha velocidad como:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{air} \Delta X = \dot{m}_s \Delta H_{bs}$$

Ecuación 2-21 Velocidad de secado

Dicha velocidad puede ser específica, referida a la unidad de masa del sólido (V) o a la superficie del producto (V_A)

$$V = \frac{\dot{m}_{agua}}{\dot{m}_s} = \frac{\Delta H_{bs}}{t} \left[\frac{kg \text{ agua}}{seg \text{ kg sólido seco}} \right]$$

$$V_A = \frac{\dot{m}_{agua}}{A} = \dot{m}_s \frac{\Delta H_{bs}}{A} \left[\frac{kg \text{ agua}}{seg \text{ m}^2} \right]$$

El factor más importante que determina dicha velocidad es la transferencia de calor por convección, entre el aire y el producto que se está secando, si se conoce el coeficiente de convección, h ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$), es posible calcular la velocidad de secado suponiendo que el producto permanece a temperatura constante T_h , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = hA\Delta T = \dot{m}_{agua} L_v(T_h)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire que entra y el producto a secar.

Recordemos que la velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso, es decir, se divide en una serie de etapas en la que la velocidad decrece conforme el tiempo transcurre.

2.19 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE SECADO

La velocidad con la que se seca un producto depende de varios factores, algunos directamente relacionados con el producto y otros relacionados con el aire de secado, entre los que se destacan:

- Isotermas de sorción del producto
- Dimensiones del producto
- Velocidad superficial relativa del aire respecto al sólido
- Temperatura del aire
- Humedad relativa del aire
- Densidad de carga, porcentaje de llenado, etc.

2.20 TIEMPO DE DESHIDRATADO

- **Área.**

Por la teoría de transferencia de calor sabemos que entre mayor sea el área expuesta, el proceso de transferencia de calor y masa se dará de una manera más rápida. Es importante cuidar el espesor de las rebanadas para que el proceso sea más ágil y lograr de esta manera un deshidratado de calidad.

- **Temperatura.**

Si la temperatura del aire es elevada, la extracción de la humedad del alimento será la adecuada, sin embargo, cada alimento requiere de temperaturas constantes y específicas ya que se pueden dañar las estructuras celulares y degradar sus propiedades organolépticas¹⁷.

- **Tiempo.**

El factor tiempo va muy de la mano con el factor temperatura, se debe guardar un equilibrio temperatura-tiempo, de tal manera que no ocasionemos un daño irreversible al alimento que se esté procesando en el deshidratador.

¹⁷ Las propiedades **organolépticas** son todas aquellas descripciones de las características físicas que tiene la materia en general y según las pueden percibir los sentidos, por ejemplo su sabor, textura, olor, color.

Por otra parte el tiempo de secado para el período de velocidad constante, V_c (por unidad de masa de sólido seco) se representa:

$$t_c = \frac{m_s(H_0 - H_c)}{m_{\dot{a}gua}} = \frac{(H_0 - H_c)}{V_c}$$

Ecuación 2-22 Tiempo de secado constante

Para el periodo de velocidad decreciente recurrimos a la siguiente ecuación

$$t_d = \left(\frac{H_c}{V_c}\right) \ln\left(\frac{H_c}{H_l}\right)$$

Ecuación 2-23 Tiempo de secado decreciente

Donde en ambos casos, las humedades H están expresadas en base seca.

- **Velocidad del aire.**

El aire caliente a su paso por el túnel de secado se irá saturando paulatinamente hasta alcanzar un punto en el que no podrá aceptar más humedad, por esta razón es importante que esté en movimiento y se realicen los cálculos adecuados para tener un aire saturado justo al final del túnel de secado y no a la mitad del recorrido, teniendo el riesgo de condensado que eso provoque una rehidratación del alimento.

- **Humedad del aire.**

Como se mencionó anteriormente entre más seco esté el aire, tendrá una mayor capacidad de extracción de humedad del alimento, debido a que su presión de vapor es menor que la del alimento, Por tal razón, se pasa el aire por un calefactor para disminuir su presión de vapor y tener un proceso eficaz.

- **Propiedades de los alimentos.**

Los alimentos que pueden deshidratarse son variados y cada uno de ellos posee propiedades físicas diferentes que deben ser contempladas para su conservación, mientras el proceso de secado se lleva a cabo.

2.21 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SECADO

La eficiencia en un secador es la relación entre la energía necesaria para evaporar el agua (kJ) de una masa específica del material y la energía realmente consumida (kJ):

$$Ef = \frac{[(\text{masa agua evaporada})(\text{calor latente de vaporización del agua})]}{(\text{masa combustible})(\text{poder calorífico combustible})} 100$$

Otra forma de medir la eficiencia, es por medio de la medición de las temperaturas del aire a la entrada del secador, a la salida del mismo y del ambiente, utilizando la relación (Aguilar, 1966):

$$Ef^* = \frac{T_{ae} - T_{as}}{T_{ae} - T_{amb}} 100$$

Ecuación 2-24 Eficiencia térmica del secado

Estos cálculos son relativamente aproximados, y los mismos autores (Aguilar, 1966) proponen para una mayor exactitud, emplear la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) del aire de secado en el numerador de la ecuación, en lugar de la temperatura del aire a la salida (T_{as}), en donde: el aire a la salida del secador esta saturado y su valor es muy cercano a la temperatura ambiente (T_{amb}) y el resultado se aproxima más al 100%

Agua a evaporar:

$$\frac{(H_{ini} - H_{fin})}{(100 - H_{fin})} 100 = \%agua$$

Ecuación 2-25 Agua que se requiere evaporar

Masa de agua a evaporar

$$M_{agua} = (\% \text{ de agua}) \text{ masa total del producto (kg)}$$

La eficiencia Ef es:

$$Ef = \frac{M_{agua} \lambda_{agua}}{M_{comb} \lambda_{comb}} 100$$

2.22 CONCLUSIONES

El deshidratado de alimentos es una actividad con mucha historia, diferentes culturas alrededor del mundo la emplearon, permitiéndoles la subsistencia en temporadas donde el alimento no era de fácil acceso o simplemente con la finalidad de aprovechar las mejores propiedades de los deshidratados.

Actualmente se sigue deshidratando y los objetivos no han cambiado del todo, ya que se sigue buscando la preservación para periodos largos de almacenaje, pero ahora lo que hay atrás de este objetivo primario, es la facilidad de transportación, pues al verse reducido su peso y espacio, se consume menos combustible para su transporte, permitiendo embalar más producto en un mismo viaje. Misiones espaciales, en parte deben su éxito a este tipo de alimentos. La gastronomía ha descubierto que el sabor de estos alimentos al final del secado es potencializado e incluso algunas propiedades nutrimentales mejoradas.

La dinámica del secado es un proceso muy complejo en el que intervienen muchos factores que están íntimamente ligados, los balances de masa y energía nos darán la pauta para determinar la cantidad de energía necesaria en cada una de las diferentes etapas del secado, pues no debemos olvidar que no es un proceso donde la extracción de la humedad contenida en el tejido orgánico se realiza de manera constante, Parámetros como velocidad del aire, temperatura ambiente, humedad relativa y absoluta, así como la humedad base húmeda del alimento y la temperatura máxima permisible, se concatenan para diseñar un proceso de secado exclusivo a cada tipo de alimento con condiciones operativas diferentes.

En conclusión este capítulo sentó las bases mínimas requeridas para:

1. Entender el proceso de deshidratado
2. Poder establecer las condiciones operativas del deshidratador, en función del tipo de alimentos y del lugar donde serán procesados.

Capítulo 3 Propuesta de diseño deshidratador IIDEA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente apartado se aplicará una metodología de diseño basada en los análisis termodinámicos expuestos en el capítulo anterior y se tomarán en cuenta los principios básicos de la deshidratación; llegando así a la propuesta geométrica y características físicas para un deshidratador de alimentos que opere con energía geotérmica y/o solar.

3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo, en el cual se deben tomar decisiones con muy poca información, en otras con apenas la cantidad adecuada y en ocasiones con un exceso de información parcialmente contradictoria. Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa, por lo cual es conveniente reservarse el derecho de hacer ajustes a medida que se obtengan más datos.

Cada diseñador es libre de tener su propio sistema iterativo de diseño. Las fuentes personales de creatividad de un diseñador, la habilidad para comunicarse y la destreza para resolver problemas están entrelazadas con el conocimiento de la tecnología y sus principios fundamentales. Para este trabajo en particular se aplicará el siguiente proceso de diseño.

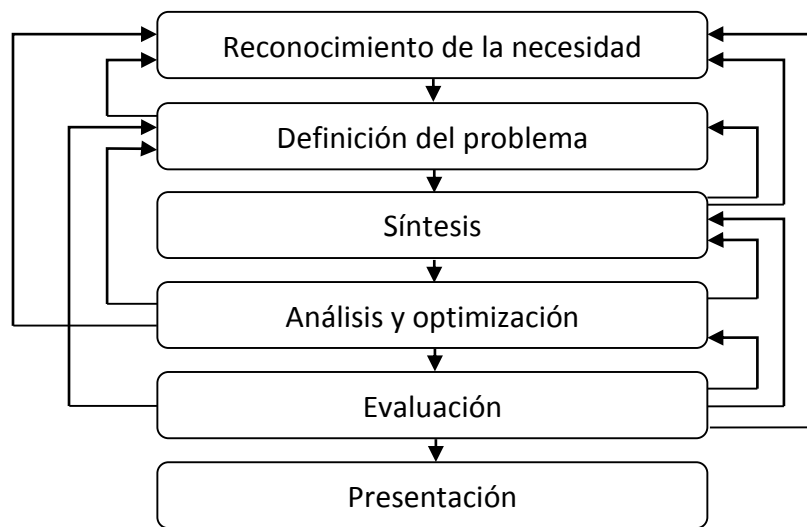


Fig. 3.1.- Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones (Budyas, 2008).

El objetivo es conjugar las herramientas de la ingeniería (como las matemáticas, la estadística, la computación, las gráficas y el lenguaje) para producir un plan que cuando se lleva a cabo cree un producto funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que se pueda fabricar y comercializar, sin importar quién lo construya o lo use.

3.3 PROPUESTA DE DISEÑO

3.3.1 Reconocimiento de la necesidad

De acuerdo con la organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); en México, se desperdician más de 20 mil millones de toneladas de comida al año, al tiempo que 18.8 % de la población –poco más de 20 millones de personas- sufre de pobreza alimentaria” (Servín, 2012)



Fig. 3.2.- Pepena de alimentos desechados en la Central de Abasto [Foto Jesús Villaseca] (Servín, 2012).

Por otra parte el consumo de orgánicos en Europa está a la alza. “Los europeos tienen más cultura en su alimentación que los estadounidenses”, dijo Javier Jussepe, Director de Biotecnología y Agronegocios de la Unidad de Promoción de Exportaciones de ProMéxico (Flores, 2009).

Aprovechando la magnífica biodiversidad de nuestro país, así como su potencial en el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía, se pueden introducir al mercado internacional frutas y verduras deshidratadas, este tipo de productos orgánicos

representa una interesante oportunidad de mercado para las empresas mexicanas¹⁸ e incluso para los productores en el campo, viéndose beneficiados al disminuir sus mermas, por lo que si se fortalecen estos sectores, la economía del país, por consecuencia, se verá beneficiada.

3.3.2 Definición del problema

Los alimentos sufren el ataque destructivo de ciertos agentes (principalmente hongos y bacterias) que causan desde su descomposición y consecuente pérdida de apariencia, textura, sabor y propiedades nutritivas, hasta la contaminación con riesgos severos para la salud.

La conservación de alimentos se da por un conjunto de procedimientos y recursos que se utilizan para preparar y envasar los productos alimenticios, con el fin de guardarlos y consumirlos mucho tiempo después, esta es una necesidad de muchos productores mexicanos, quienes frecuentemente recurren al proceso de refrigeración como medio de conservación, por ejemplo para la manzana en el estado de Chihuahua; sin embargo, esta forma de conservación resulta difícil de costear al tener pérdidas del producto como merma en gran medida por la desigualdad en condiciones de comercialización, un ejemplo de ello lo es la manzana procedente del vecino del norte, en vista de que no se han establecido reglas fitosanitarias más estrictas que impidan el ingreso de producción de desecho, como sucedió en marzo de 2014 con manzanas de Estados Unidos¹⁹.

3.3.3 Síntesis

Se ha retomado el proyecto “Deshidratador de Tomates utilizando energía Geotérmica para Ensenada, B.C.” propuesto por el grupo IMPULSA IV actualmente llamado IIDEA. El deshidratador construido fue el siguiente:

¹⁸ En 2007 México exporto productos orgánicos por un valor de 16 billones de dólares (Flores, 2009).

¹⁹ Productores de manzana “Enfrentan dificultades para saldar adeudo con CFE, ante pérdidas por \$2 millones de pesos” (U., 2014)



Fig. 3.3.- Deshidratador IMPULSA en funcionamiento; 1) Túnel de secado, 2) Charolas con producto (jitomate y manzana), 3) Soplador, 4) Serpentin calefactor, 5) Calentador de agua para simular el flujo geotérmico

(Alejandro, 2009).

Dicho deshidratador permitió hacer pruebas experimentales y obtener información para realizar la siguiente propuesta de diseño.

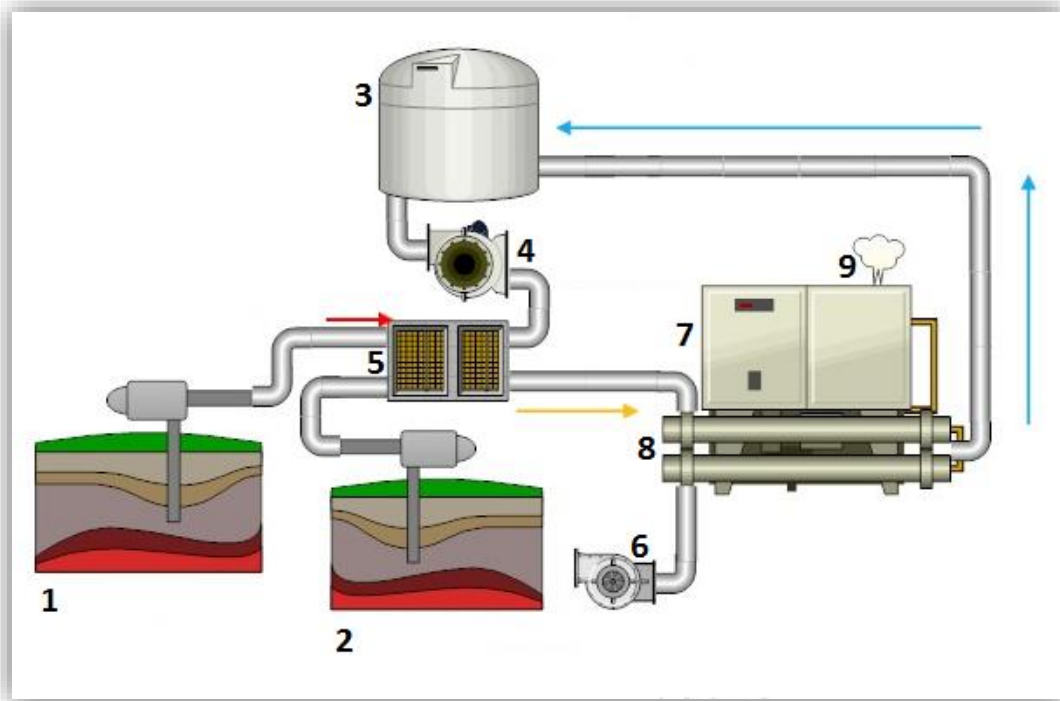
3.3.4 Análisis y optimización

3.3.4.1 Diagrama general del proceso

El siguiente diagrama muestra el funcionamiento del deshidratador geotérmico, donde la fuente de calor es el recurso geotérmico de baja entalpía y el agua desmineralizada será calentada con dicho recurso, empleando un intercambiador de placas planas²⁰. Una vez

²⁰ La ventaja de emplear este sistema de calentamiento es la facilidad de mantenimiento. Como sabemos el recurso geotérmico arrastra una serie de sales y minerales a su paso por el manto terrestre hasta la superficie, algunos de estos minerales van desde litio, bromo, cloruro de potasio y calcio. Dichos minerales causarán efectos incrustantes y/o corrosivos en las placas, cuya limpieza es sencilla. Cuando una o varias placas requieren de mantenimiento son removidas y reemplazadas por otras (para garantizar el funcionamiento

calentada el agua, se bombea el agua caliente desmineralizada a través del segundo cambiador de calor para de este modo secar el aire; cuando el contenido de humedad del aire ha disminuido este es forzado por el ventilador a ingresar dentro de la cámara de secado, una vez desecado el alimento, el aire es retirado y expulsado por la chimenea hacia el exterior.



1. Pozo productor geotérmico
2. Pozo de reinyección geotérmico
3. Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada
4. Bomba de agua
5. Intercambiador de calor de placas planas
6. Ventilador
7. Deshidratador
8. Intercambiador de calor agua-aire
9. Chimenea

continuo del deshidratador). Sin el empleo de dicho intercambiador de calor el problema se acentuaría en el segundo cambiador de calor, para lo cual el mantenimiento sería más tardado y en caso de avería por picaduras, se requeriría de un gasto fuerte para su reemplazo.

3.3.4.2 Conceptualización del diseño

El diseño se conceptualizó en una serie de bocetos, de los cuales se seleccionó el siguiente:

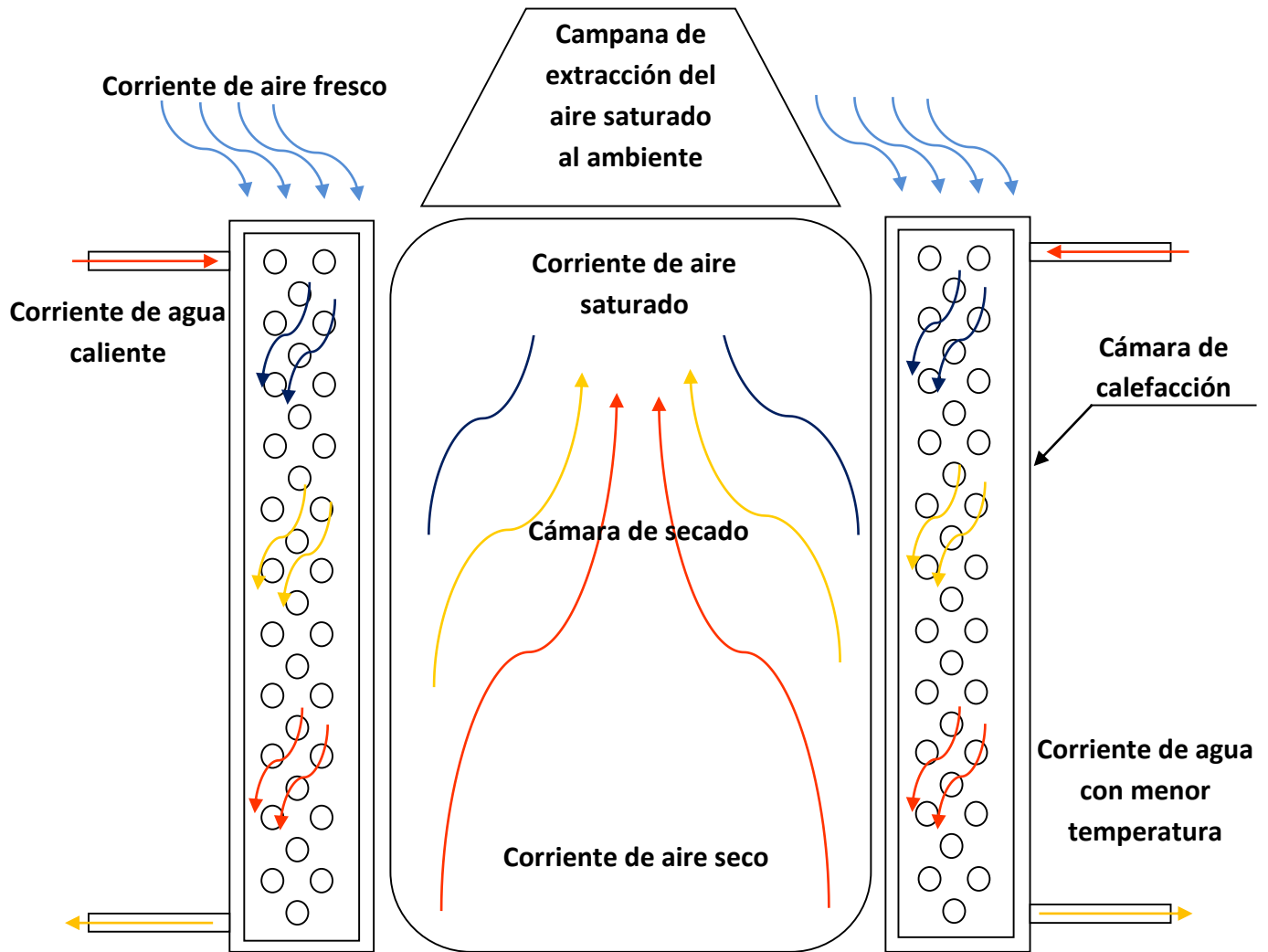


Fig. 3.4 Boceto de Deshidratador Geotérmico

Para tener una mejor idea del concepto de diseño se hizo una maqueta, donde se aprecia el acoplamiento de calentadores solares de aire y agua, así como un termo-tanque para el almacenamiento del agua caliente.



Fig. 3.5 Propuesta de diseño en maqueta, vista frontal [Hecha por el autor]

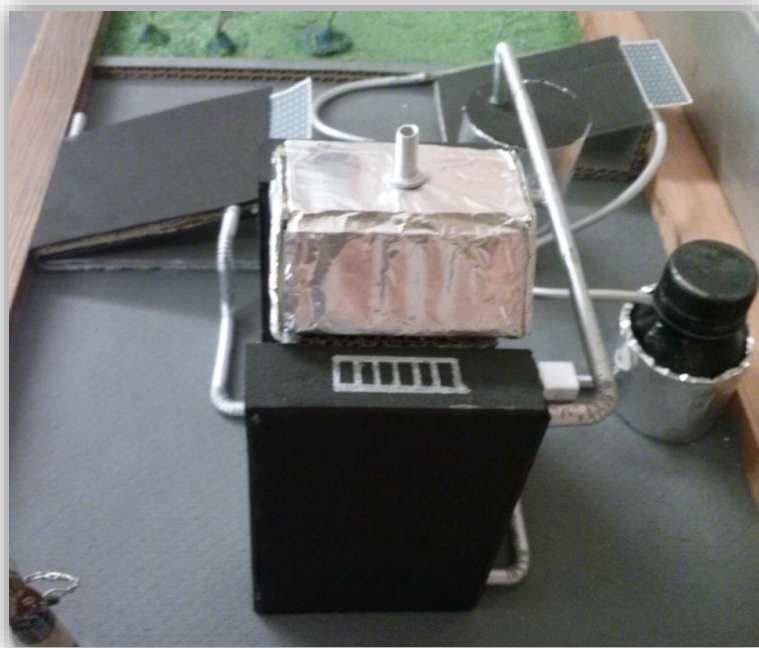


Fig. 3.6 Propuesta de diseño en maqueta, vista lateral [Hecha por el autor]



Fig. 3.7 Deshidratador, propuesta de diseño vista frontal [Hecha por el autor]

3.3.5 Bases de diseño

Con base a los resultados obtenidos en el laboratorio de pruebas IIDEA, se determinó que para el secado de Jitomate tipo bola es necesario acondicionar el túnel de secado a una temperatura no mayor de 65 °C, para no deteriorar el producto, con velocidades de aire entre 1.5 y 2.5 m/s.

El lugar donde se planea utilizar el deshidratador es en el municipio de Ensenada, B.C., donde las temperaturas máximas y mínimas promedio son 36.5 y 1.1 °C respectivamente.

Se propone procesar 85 Kg de jitomate (en producto húmedo) hasta una humedad final del 8%, es importante tomar en cuenta que el tomate tiene una humedad promedio inicial de 95%

3.3.5.1 Cálculos para el diseño del intercambiador de calor

De la ecuación 2-16 despejamos M y tenemos:

$$M = 85 \left(\frac{100 - 95}{100 - 8} \right) = 4.62 \text{ kg}$$

De la tabla 2.4 se sabe que el valor de 2,511 kJ/kg de agua, no puede ser disminuido de ninguna forma pues es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua. Las otras pérdidas se reducirán haciendo más eficiente el proceso.

Para determinar el porcentaje de humedad a eliminar por kg de agua se utiliza la ecuación 2-27, en donde H_{ini} y H_{fin} son la humedad inicial y final respectivamente; M_p la masa de material a secar. Sustituyendo los valores en la ecuación se tiene:

$$\frac{95 - 8}{100 - 8} * (85) = 80.4 \text{ kg de agua a evaporar}$$

Y la cantidad de energía a suministrar, tomando el valor recomendado de 4,185 kJ por kg de agua evaporada:

$$\dot{Q} = 4,185 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 80.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 336,392 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 93 \text{ kW}$$

3.3.5.2 Condiciones operativas

Se ha calculado este deshidratador para su operación en el municipio de Ensenada Baja California, donde las condiciones operativas son las siguientes:

Temperatura máxima promedio²¹: 36.5 °C

Temperatura mínima promedio: 1.1 °C

Temperatura bulbo seco: 34 °C

Temperatura bulbo húmedo: 28 °C

Presión atmosférica: 101.235 kPa

Cp agua: 4.193 kJ/ kg K

²¹ Obtenido de (Gobierno de Mexicali, 2014)

Cp aire: 1.008 kJ/ kg K

Densidad agua: 974.9 kg/m³

Densidad aire: 1.301 kg/m³

Viscosidad dinámica agua: 3.778 E-04 kg/m s

Viscosidad dinámica aire: 1.960 E-05 kg/m s

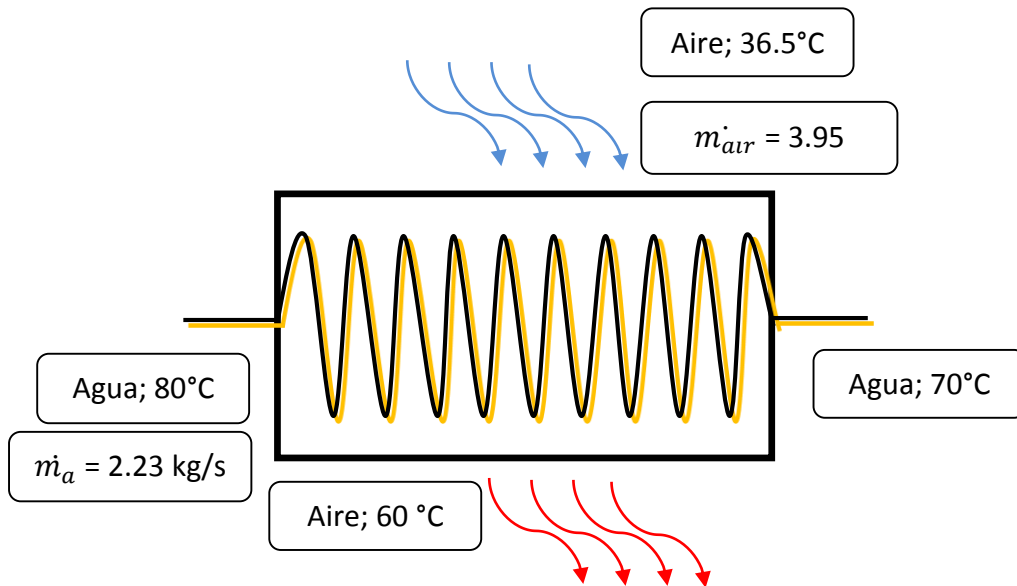
Conductividad térmica agua: 0.667 W/m*K

Conductividad térmica aire: 0.0275 W/m*K

3.3.5.3 Balance de energía y masa para el diseño del intercambiador de calor

$$\dot{Q} = \dot{m}_a C p_a \Delta T_a = \dot{m}_{air} C p_{air} \Delta T_{air}$$

Ecuación 3-1 Ecuación de la energía



3.3.5.4 Diseño del intercambiador de calor

Para el diseño del intercambiador de calor se empleará tubería de aletas concéntricas de acero inoxidable con diámetro interno de 47.5 mm, diámetro externo de 50 mm y diámetro de aletas de 69.1 mm.



Fig. 3.8 Detalle de la tubería aletada (Alejandro, 2009).

El método utilizado para este diseño será el de la diferencia media logarítmica de temperaturas.

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{ml}$$

Ecuación 3-2 Método de la LMTD

Como se aprecia en el diagrama, el deshidratador se compondrá de dos cambiadores de calor a sus extremos por lo que los 93.4 kW y los flujos máxicos respectivos, aire y agua, se dividen en dos partes iguales.

En la ecuación 3-2, la incógnita es el área necesaria para transferir 46.7 kW de energía térmica provenientes de 1.11 kg/s de agua hacia 1.97 kg/s de flujo máxico de aire.

Despejando A_s tenemos:

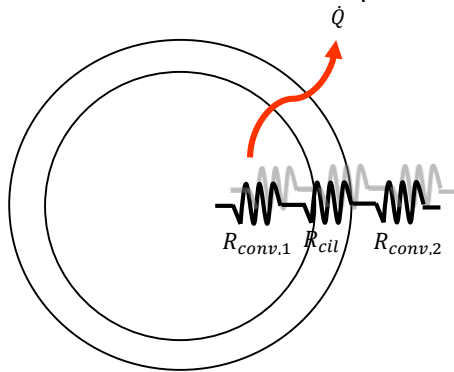
$$A_s = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{ml}}$$

Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

| Factor de corrección $\Delta T_{mi,CF}$ | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------|----------------------|---|
| $\Delta T_{mi} = F \Delta T_{mi,CF}$ | $T_{c,ent}$ | F | Factor de corrección | |
| | 36.5 °C | | | $P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = 0.54$ |
| | | | | $R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = 0.426$ |
| | $T_{c,sal}$ | | | |
| | 60 °C | $\Delta T_1 = T_{h,ent} - T_{c,sal}$ | 20 °C | $F = 0.949$ |
| $\Delta T_{mi} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$ | | $\Delta T_2 = T_{h,sal} - T_{c,ent}$ | 34 °C | |
| | | ΔT_{mi} | 26.17 | ΔT_{mi} 24.84 |

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Para determinar esta variable emplearemos el método de la red de resistencias térmicas



$$R_{TOTAL} = \frac{1}{h_1} + R_{f,i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + R_{f,o} + \frac{1}{h_2}$$

$$\frac{1}{U} = R_{TOTAL} = R_{conv,1} + R_{f,i} + R_{cil} + R_{f,o} + R_{conv,2}$$

Ecuación 3-3 Suma de resistencias térmicas

- Cálculo del coeficiente convectivo del agua

| Coeficientes convectivos agua h_1 | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--|---------------|---------------------|
| Reynolds | $Re_D = \frac{\rho V D}{\mu}$ | Área de Paso Fluído | 0.00177 | [m ²] |
| 660 | | Perímetro Mojado | 0.14923 | [m] |
| Factor de fricción | $f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$ | Diámetro Hidráulico | 0.0475 | [m] |
| 0.09702 | Solo para $Re > 2,000$ | Flujo por unidad de conducción (tubo, haz) | 0.00930 | [kg/s] |
| Prandlt | | Velocidad media | 0.00538 | [m/s] |
| 2.375 | | Núm. Reynolds hidráulico | 660 | [] |
| | | Coeficiente convectivo corregido | 86,541 | W/m ² *K |

- **Cálculo del coeficiente convectivo del aire**

El arreglo de tubos que se propone, es un arreglo triangular equilátero.

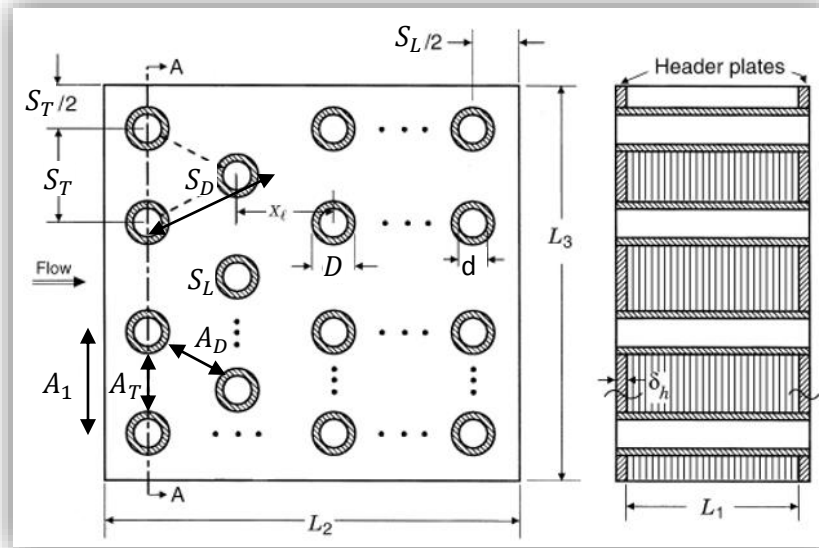


Fig. 3.9 Arreglo triangular. a) vista frontal; b) vista lateral

| Datos [m] | |
|---------------------|-------|
| S_L | 0.063 |
| S_D | 0.073 |
| S_T | 0.073 |
| A_1 | 0.073 |
| A_T | 0.023 |
| A_D | 0.023 |
| \varnothing_{out} | 0.050 |
| \varnothing_{fin} | 0.069 |
| L [m] | 1.000 |

| Para la configuración escalonada tenemos que | | |
|--|-------|-----|
| $A_1 = S_T L$ | 0.073 | [m] |
| $A_T = (S_T - D)L$ | 0.023 | [m] |
| $A_D = (S_D - D)L$ | 0.023 | [m] |
| $S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2}$ | 0.073 | [m] |

| Datos geométricos | | | | |
|--------------------------------|--|--|--------|-----------------------|
| Numero de columnas máximo | | | 5 | |
| Número de filas | | | 27 | |
| Ancho del haz " L2 " | | | 0.3625 | m |
| Longitud de tubo " L1 " | | | 1 | m |
| Area de Paso Fluido | | | 0.0994 | [m ²] |
| Flujo frontal | | | 0.3625 | [m ²] |
| Área tubo desnudo | | | 0.1354 | [m ²] |
| Área aletas | | | 1.4036 | [m ²] |
| Área total | | | 1.5390 | [m ²] |
| Perímetro proyectado | | | 16.736 | [m] |
| Diámetro para transferir calor | | | 0.059 | [m] |
| Diámetro equivalente fricción | | | 0.030 | [m] |
| Volumen Libre Neto | | | 0.0117 | [m ³] |
| Caudal de aire | | | 2.0 | [kg/s] |
| Masa velocidad | | | 19.85 | [kgm ² /s] |
| Núm. Reynolds | | | 59,289 | [] |
| Núm. Reynolds ΔP | | | 30,839 | [] |
| Correlación de Jameson J_h | | | 261.80 | [] |
| $h'f$ | | | 110.25 | W/m ² *K |
| Eficiencia de aleta η | | | 0.97 | [] |
| Coeficiente convectivo | | | 106.88 | w/m ² *K |

| CONFIGURACIÓN DEL ÁREA DE INTERCAMBIO DE CALOR | | | | |
|--|--|--|--------|----------------------|
| Carga térmica necesaria | | | 46,721 | [W] |
| Coefficiente Global de Transferencia de Calor | | | 100 | [W/m ² K] |
| Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica | | | 24.8 | [°C] |
| Area Necesaria | | | 18.83 | [m ²] |
| Area por tubo | | | 0.1571 | [m ²] |
| Numero de tubos necesarios | | | 120 | |

| CÁLCULO DE PÉRDIDA DE CARGA | | | | |
|--------------------------------|--|--|--------|-------------------|
| Densidad aire de entrada | | | 1.3501 | kg/m ³ |
| Densidad aire de salida | | | 1.1501 | kg/m ³ |
| Densidad media | | | 1.2501 | kg/m ³ |
| Densidad en el ventilador | | | 1.1501 | kg/m ³ |
| Factor de fricción | | | 2.080 | |
| Delta de Presión ΔP | | | 10.96 | KPa |
| Velocidad del ventilador | | | 2.184 | m/s |
| Presión de velocidad | | | 2.743 | Pa |
| Potencia en el ventilador | | | 17.29 | kW |
| Perdida en tuberías | | | 0.027 | [Pa] |
| Constante por accesorios | | | 3 | |
| Perdida por accesorios. | | | 28,691 | [Pa] |
| Perdida total en tubos de agua | | | 28.7 | [kPa] |

| DATOS GEOMÉTRICOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR | | | | |
|--|-----------|------------|--------|-----------------------------------|
| Largo | L1 | | 1.00 | [m] |
| Ancho | L2 | | 0.363 | [m] |
| Alto | L3 | | 1.6820 | [m] |
| Volumen de unidad | | | 0.61 | [m ³] |
| Area de intercambio | | | 18.83 | [m ²] |
| Densidad de área [área/volumen de unidad] | | | 30.88 | [m ² /m ³] |
| Caída de presión total en tuberías de agua | | | 29 | [kPa] |
| Caída de presión total en banco de tubos de aire | | | 10.96 | [kPa] |
| Unidades de Transferencia térmica. | | NTU | 946 | |
| Efectividad de intercambiador | | ϵ | 90.5 | [%] |
| C* | Cmin/Cmax | | 0.426 | |

3.3.6 Evaluación

Dentro de este apartado se presentarán pruebas experimentales hechas con el prototipo del laboratorio; donde los resultados obtenidos fueron algunos de los parámetros que se tomaron como base de diseño.

3.3.6.1 Curva de secado del Jitomate

Se ingresó al deshidratador 2 kg de jitomate tipo bola. Se hizo el registro de tres muestras previamente identificadas y pesadas antes de iniciar el proceso. Las muestras 1, 2 y 3 se ubicaron al principio, mitad y final de una charola reséctivamente.



Fig. 3.10 Muestras de jitomate para su deshidratación

Se pesaron las muestras a lo largo de todo el proceso de deshidratado y se obtuvieron los siguientes resultados.



Fig. 3.11 Pesado de muestras de jitomate

| Tiempo | | Peso [g] | | |
|--------|-----|-----------|-----------|-----------|
| hrs | min | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
| 1 | 0 | 10 | 8 | 9 |
| | 20 | 9 | 7 | 9 |
| | 40 | 8 | 7 | 8 |
| | 60 | 7 | 6 | 8 |
| 2 | 80 | 6 | 5 | 7 |
| | 100 | 6 | 4 | 6 |
| | 120 | 4 | 4 | 6 |
| 3 | 140 | 4 | 3 | 6 |
| | 160 | 4 | 3 | 5 |
| | 180 | 3 | 2 | 5 |
| 4 | 200 | 2 | 2 | 4 |
| | 220 | 2 | 2 | 3 |
| | 240 | 2 | 2 | 3 |
| 5 | 260 | 1 | 1 | 2 |
| | 280 | 1 | 1 | 2 |
| | 300 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 320 | 0 | 0 | 1 |
| | 340 | 0 | 0 | 1 |
| | 360 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 3-1 Tabla de secado de jitomate

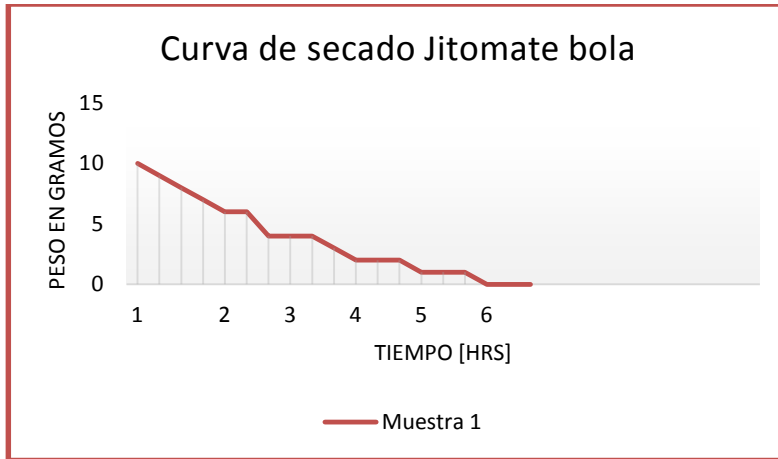


Fig. 3.12 Curva secado de jitomate muestra 1

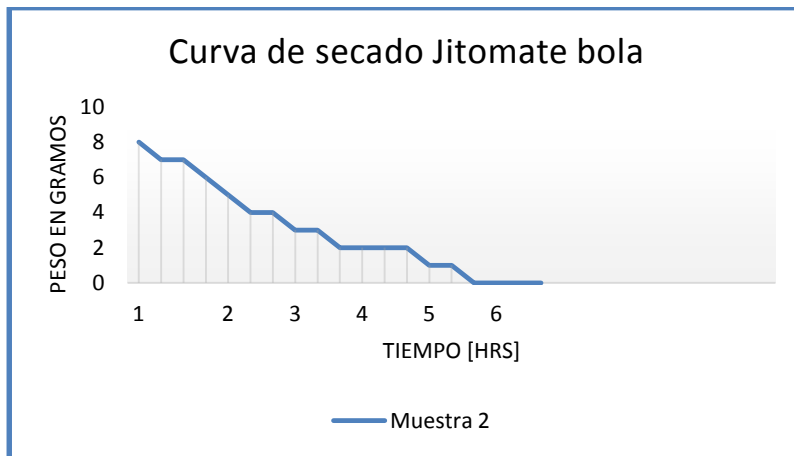


Fig. 3.13 Curva secado de jitomate muestra 2

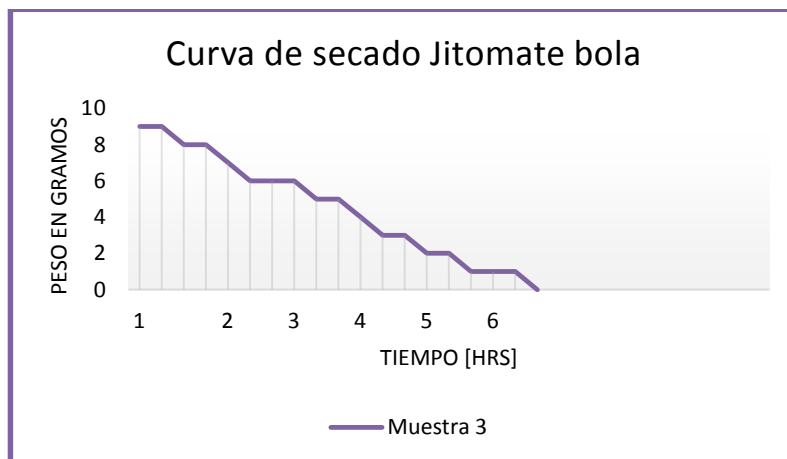


Fig. 3.14 Curva secado de jitomate muestra 3

Con la ayuda de un sensor de temperatura se obtuvo la siguiente lectura:

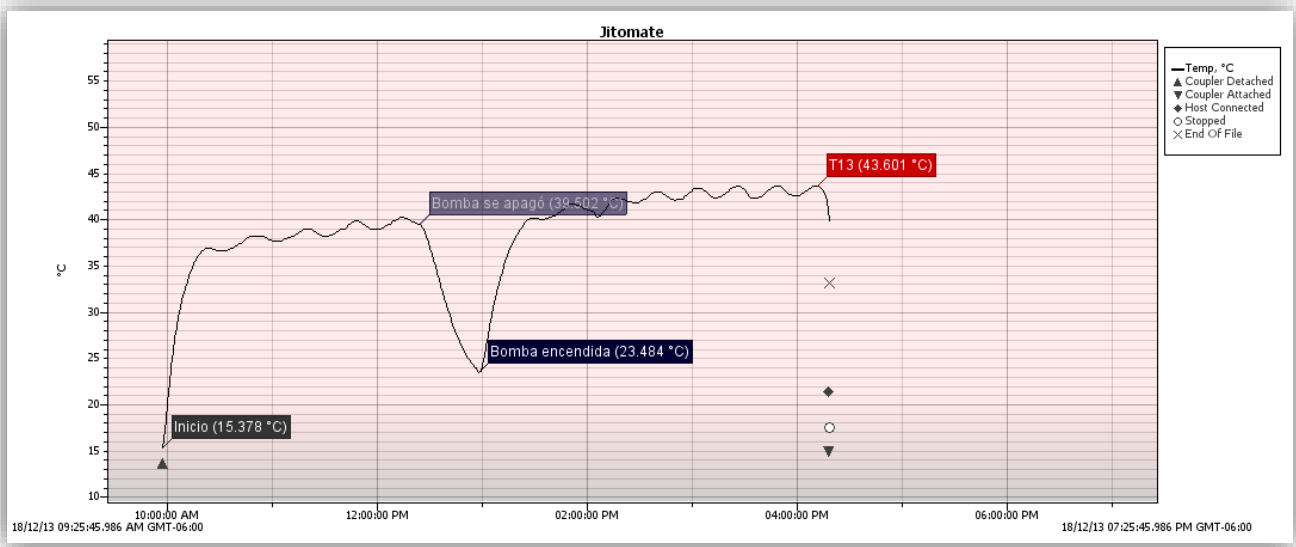


Fig. 3.15 Temperatura alcanzada dentro del deshidratador (1ra corrida)

En virtud que en esta experimentación se perdió una hora de tiempo de deshidratado por una falla en la bomba de agua, fue necesario realizar una segunda corrida.

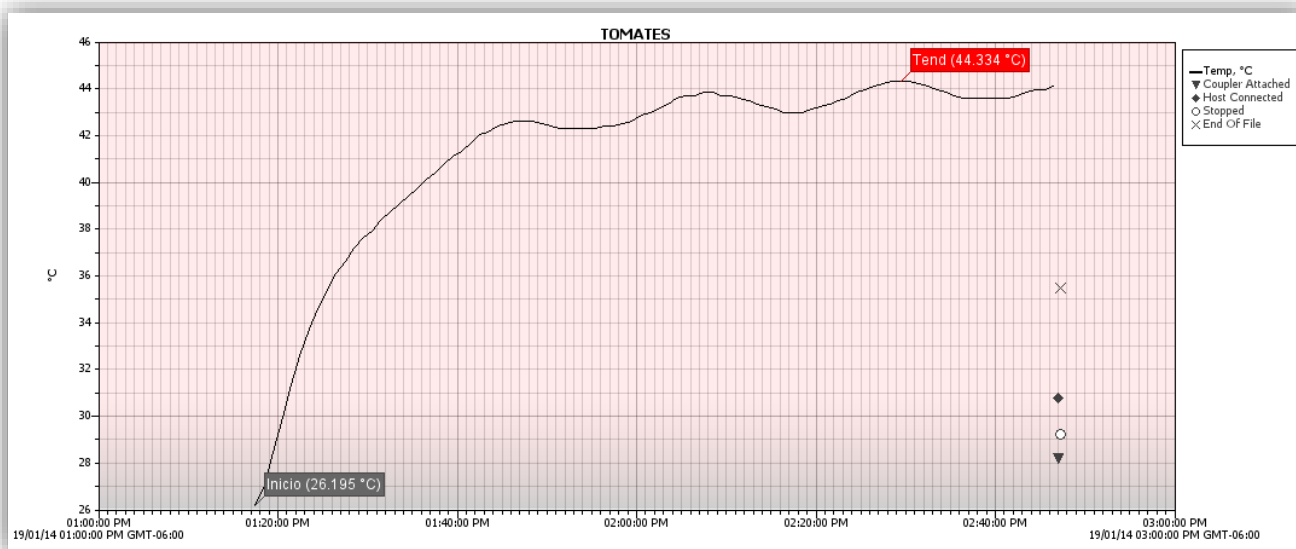


Fig. 3.16 Temperatura alcanzada dentro del deshidratador (2da corrida)

3.4 CONCLUSIONES

Durante las pruebas experimentales se determinaron los siguientes puntos que fueron de suma relevancia como punto de partida para el rediseño.

- La temperatura del agua de entrada y salida respectivamente fueron, 70°C y 69°C con una velocidad de secado de 8 m/s, por lo que es de suma importancia controlar debidamente el flujo de aire a través del secado de tal manera que tenga el suficiente tiempo para secarse y ser capaz de extraer la humedad contenida en los alimentos.
- La madera es un buen material que funciona como aislante térmico, pero puede representar un problema por la porosidad que presenta, provocando que el equipo se ensucie constantemente, lo que implicaría tener que parar el proceso por servicio de limpieza; por ello el material seleccionado para este deshidratador fue acero serie 300, es inoxidable, por lo que se le considera un material grado alimenticio.
- La tubería aletada para el cambiador de calor -corazón del deshidratador- se ha propuesto de acero inoxidable permitiéndole tener un mejor desempeño en campo, que pese a no tener mejores características de conductividad térmica como el cobre, sí presenta una mejor resistencia a la corrosión, aspecto que se debe tener en consideración debido al alto nivel de salinidad en el ambiente, lugar donde será puesto en marcha.
- Durante las pruebas experimentales se observó un deshidratado prácticamente homogéneo, atribuido a la dirección de flujo del aire paralelo al alimento, si bien también es posible hacer incidir el aire de forma perpendicular, y lograr un buen deshidratado con una correcta distribución del aire, se considera que al combinar la incidencia de los flujos sobre el alimento lograríamos un mejor resultado en la calidad del producto
- En los gráficos pueden identificarse las tres etapas de deshidratado mencionadas en la teoría correspondiente al capítulo 2. Aunque los trozos de jitomate al principio de la charola se deshidratan con mayor rapidez durante el proceso, el tiempo final de deshidratado se compensa con la demora de estos primeros trozos de jitomate al final de la corrida, tiempo en el que los trozos de jitomate al otro extremo de la charola aprovechan para tener la misma calidad de deshidratado.

Capítulo 4 CAD y Planos

4.1 INTRODUCCIÓN

Se elaboraron los planos de cada uno de los dispositivos que conforman este sistema deshidratador de alimentos, para su futura manufactura. Por lo que a continuación se presentan cada uno de estos dispositivos.

4.2 PRESENTACIÓN

Se presentarán un conjunto de imágenes con diferentes vistas y presentaciones del diseño.

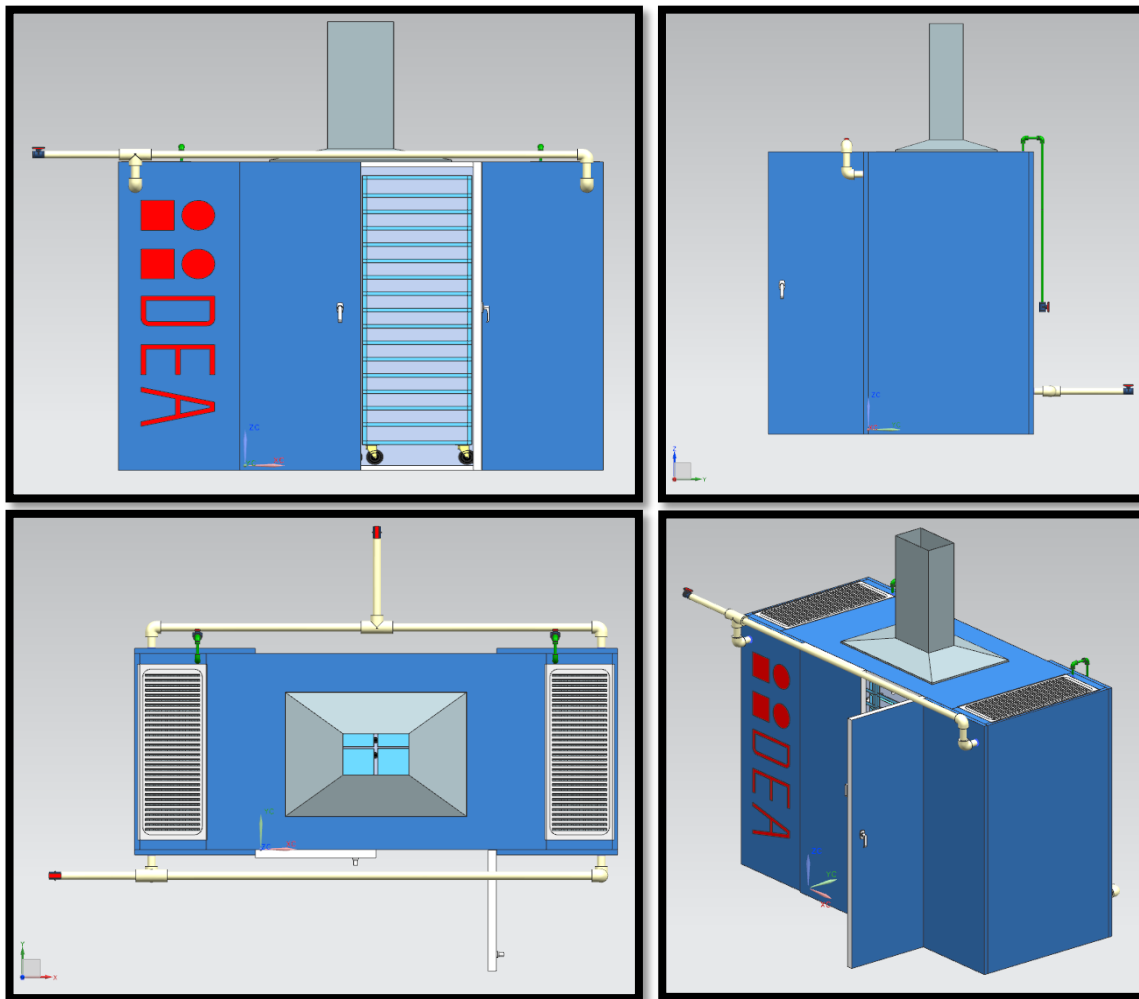


Fig. 4.1 Sistema Deshidratador de Alimentos IIDEA

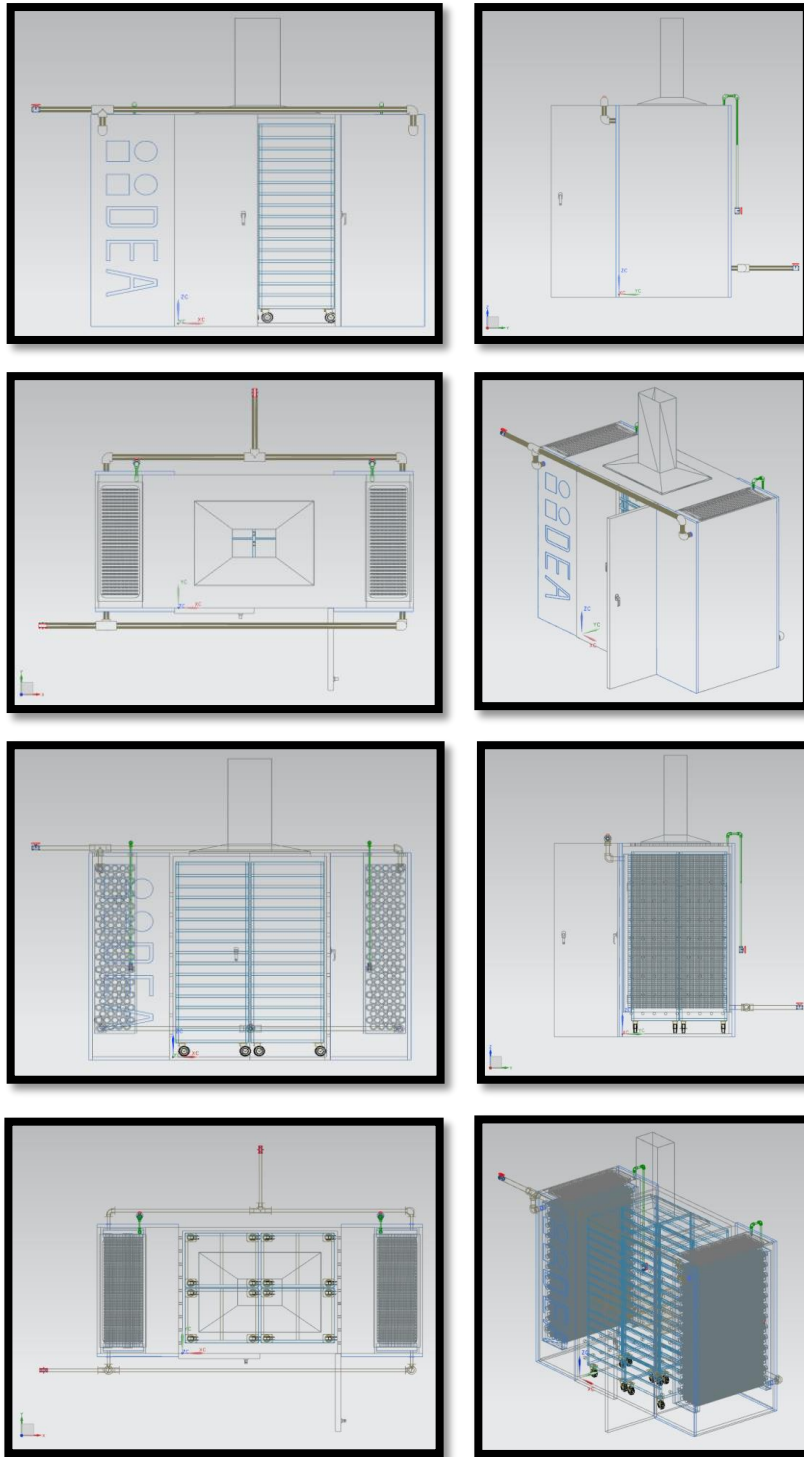


Fig. 4.2 Sistema deshidratador vista alambre

4.2.1 Accesorios

4.2.1.1 Cambiador de calor para la calefacción de aire

Para el cambiador de calor, se propuso con un diseño triangular, debido a que el coeficiente de transferencia de calor por convección es mucho mejor comparado con arreglos con tubos alineados. Las características particulares de este equipo pueden ser apreciadas en el apéndice de este trabajo.

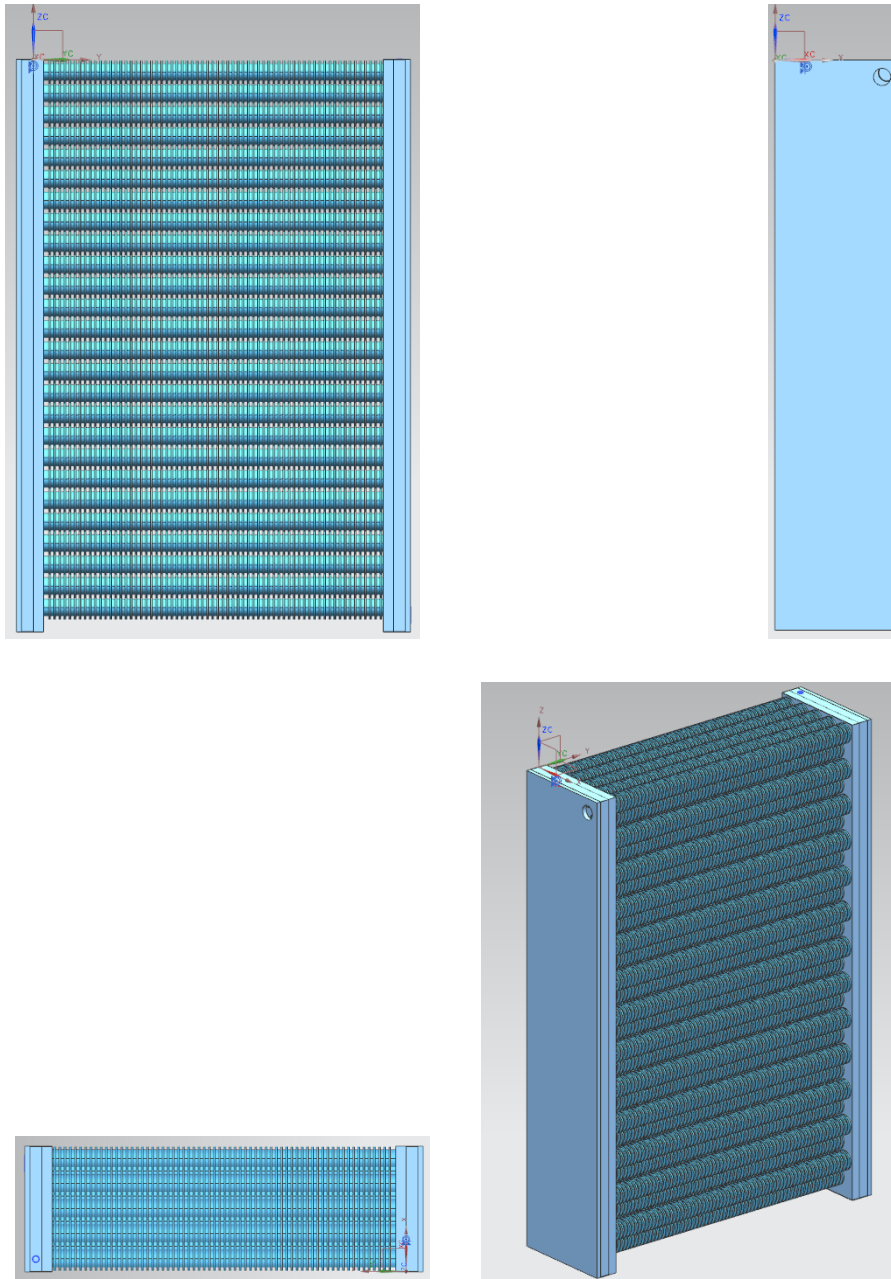


Fig. 4.3 Cambiador de calor con arreglo triangular para la calefacción del aire

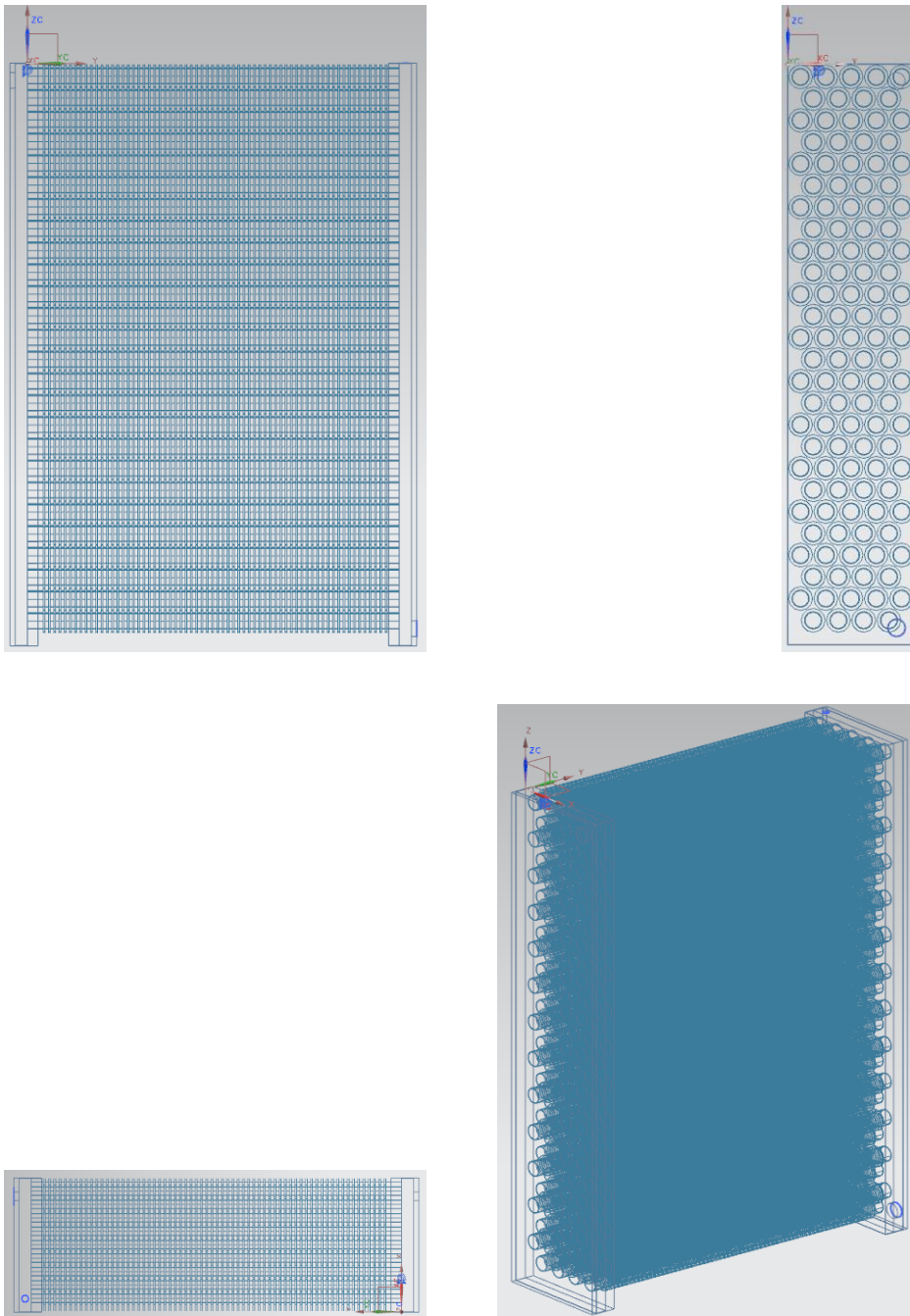
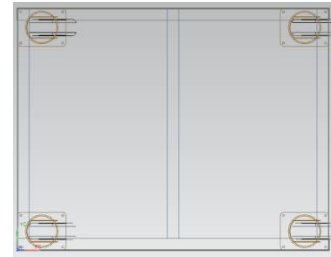


Fig. 4.4 Cambiador de calor arreglo triangular vista alambre



4.2.1.2 Espiguero

El espiguero se propone de acero serie 300 y con medidas comerciales.

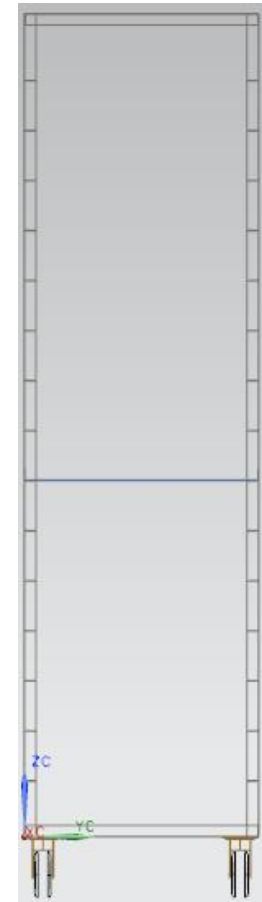
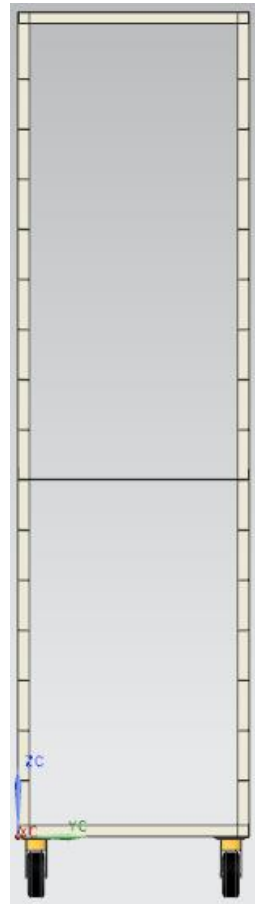
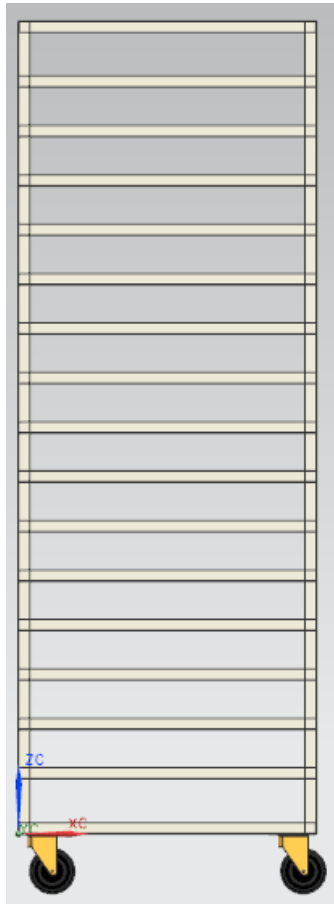
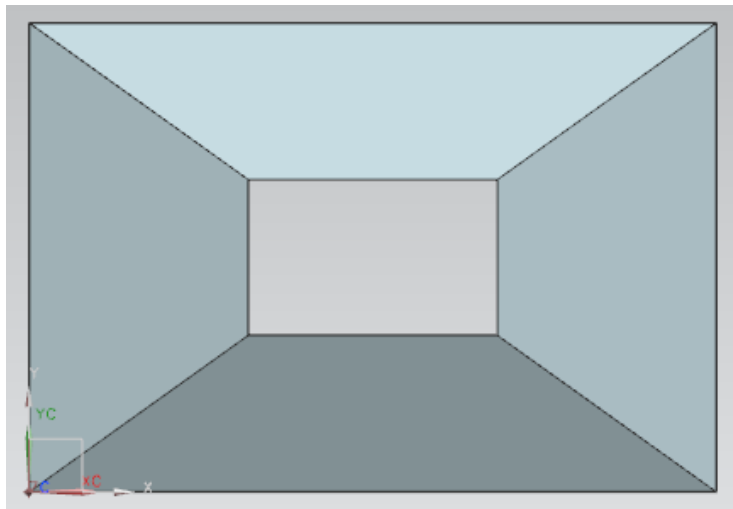
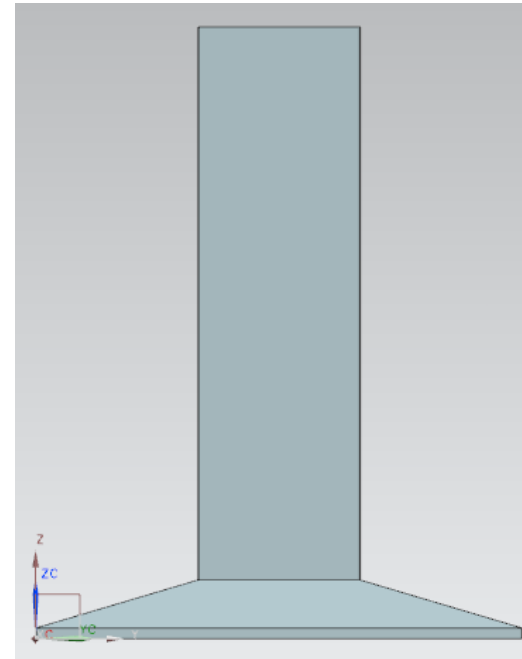
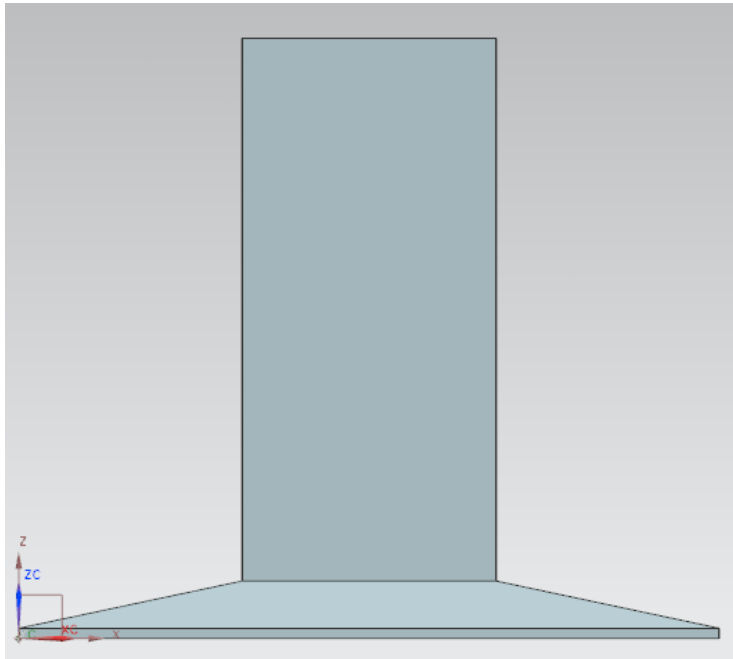


Fig. 4.5 Espiguero con charola para el deshidratado de alimentos; vista sólido y alambre respectivamente



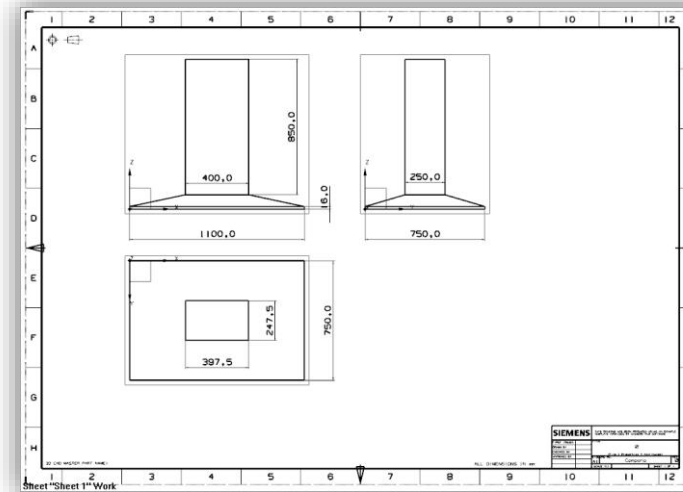
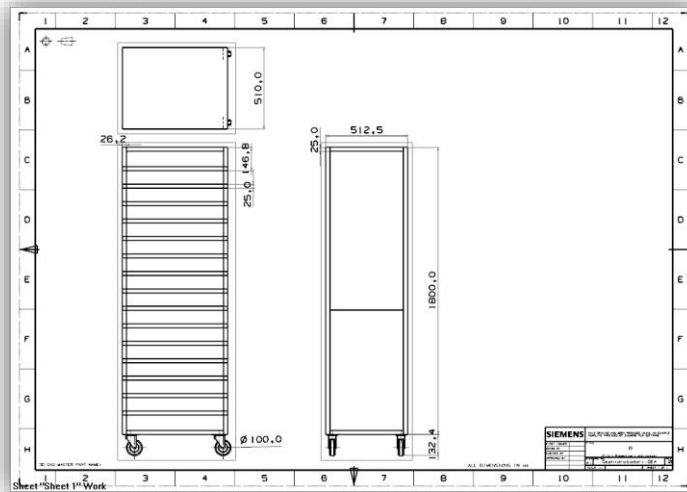
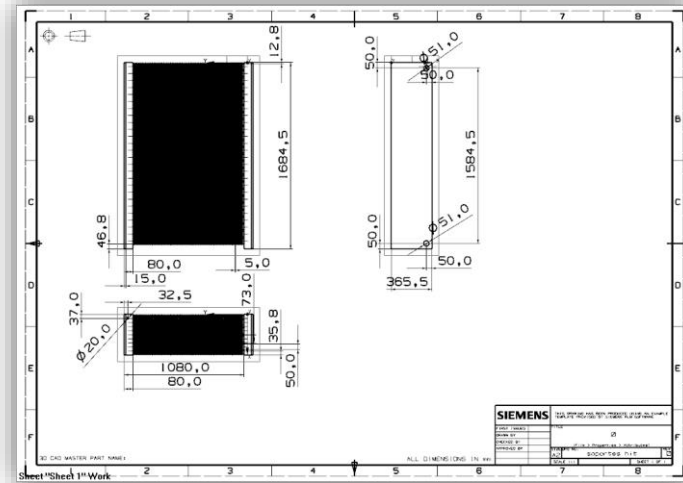
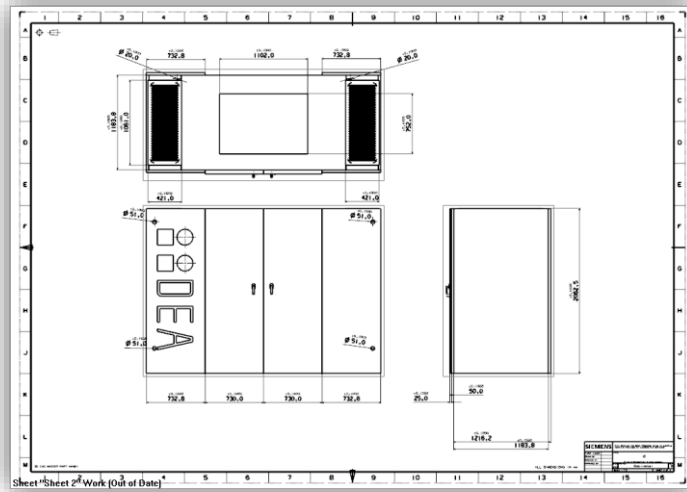
4.2.1.3 Campana de extracción

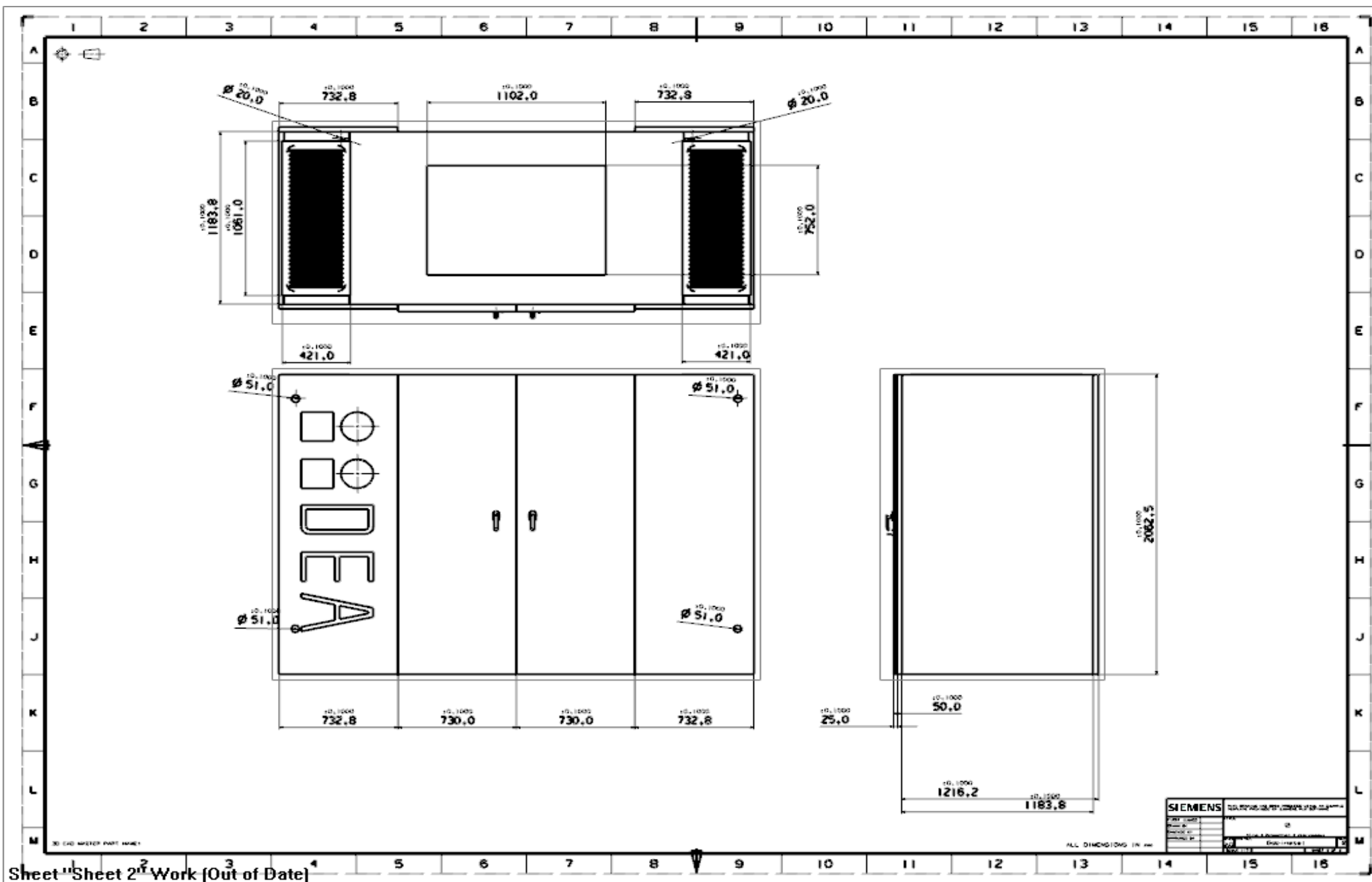
La campana de extracción de aire se propuso en base a diseños y medidas comerciales.

Está elaborada con láminas de acero, iluminación opcional, 3 velocidades con temporizador.

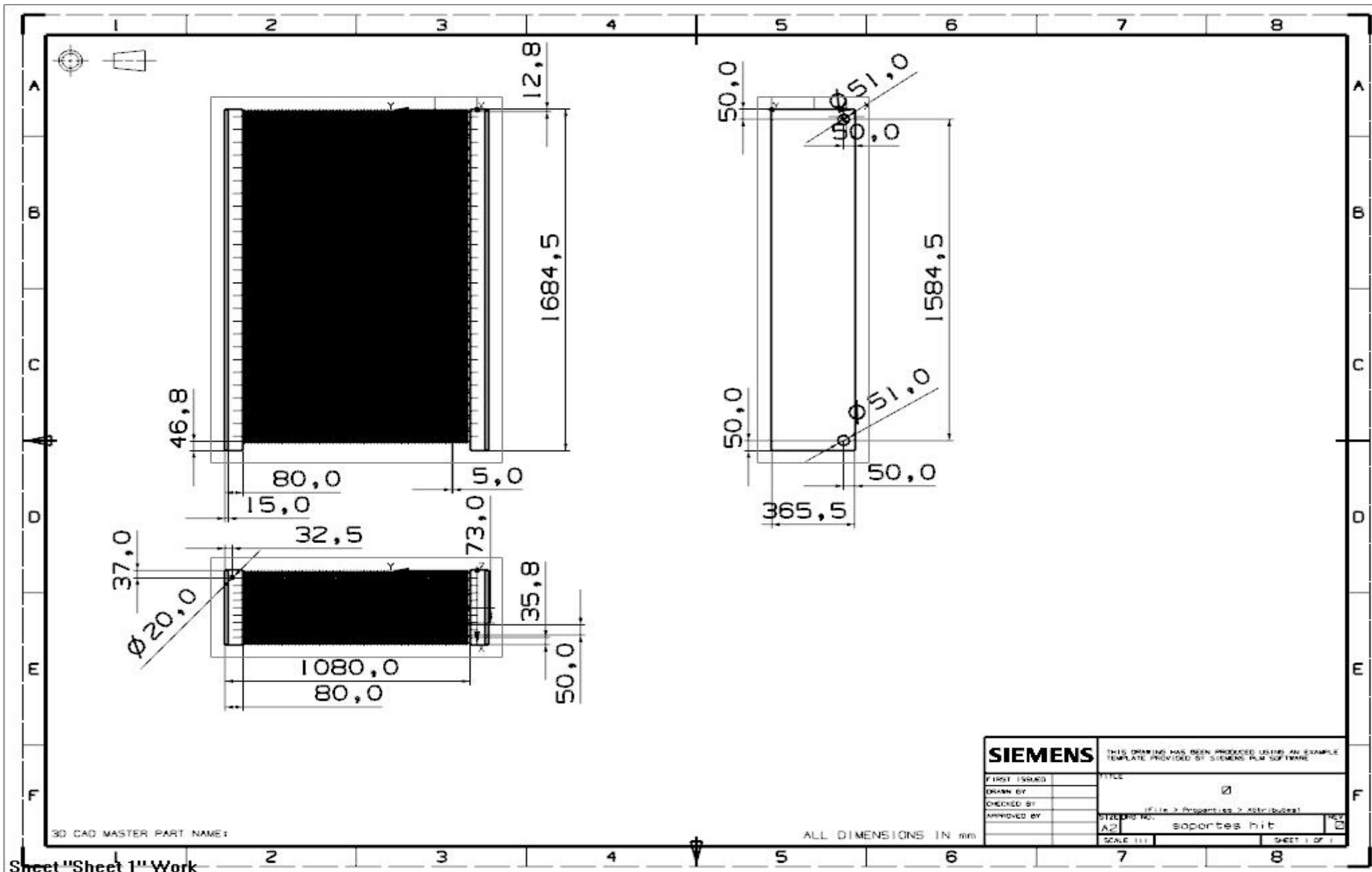
Fig. 4.6 Campana de extracción de aire

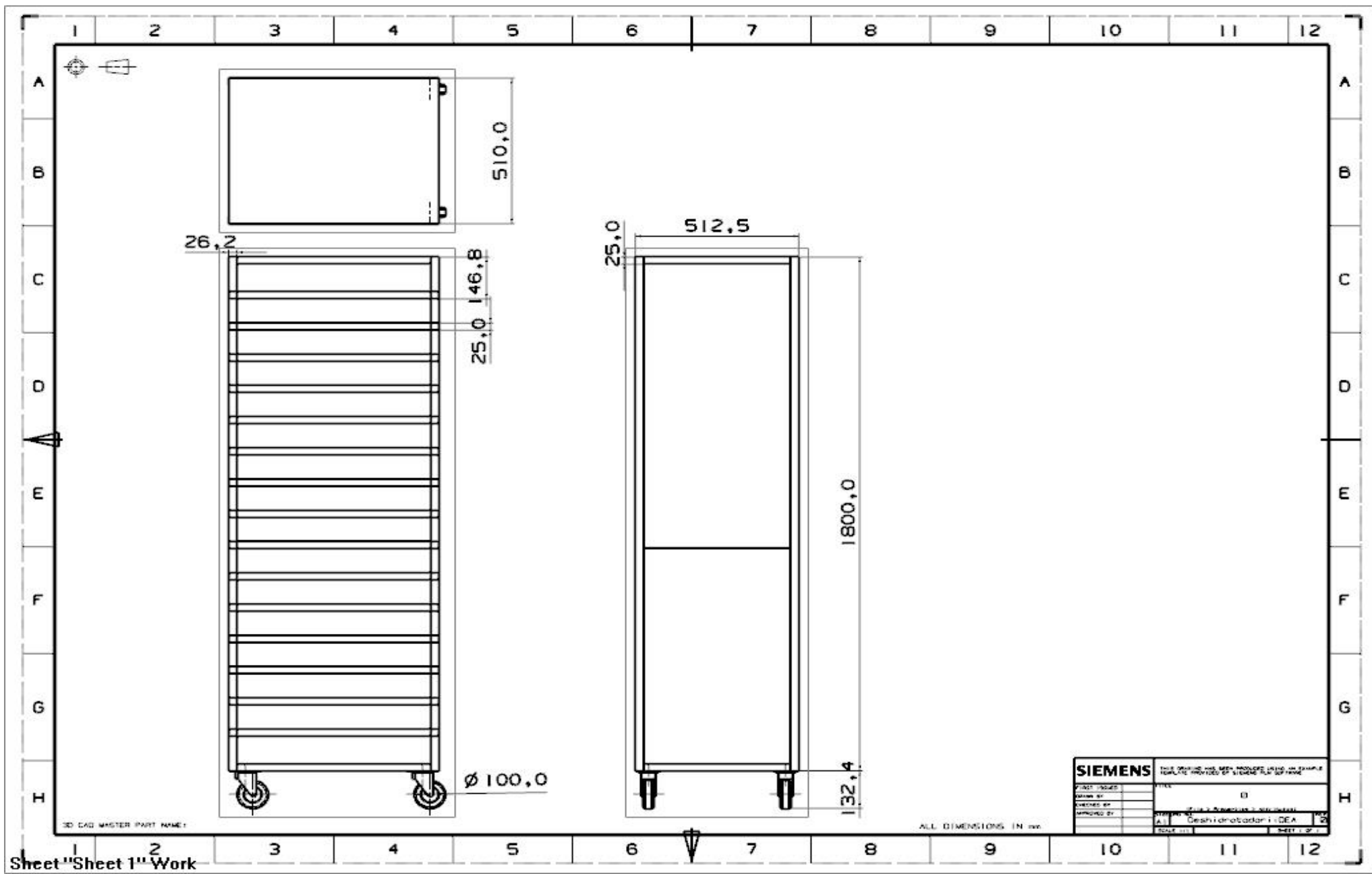
4.3 PLANOS

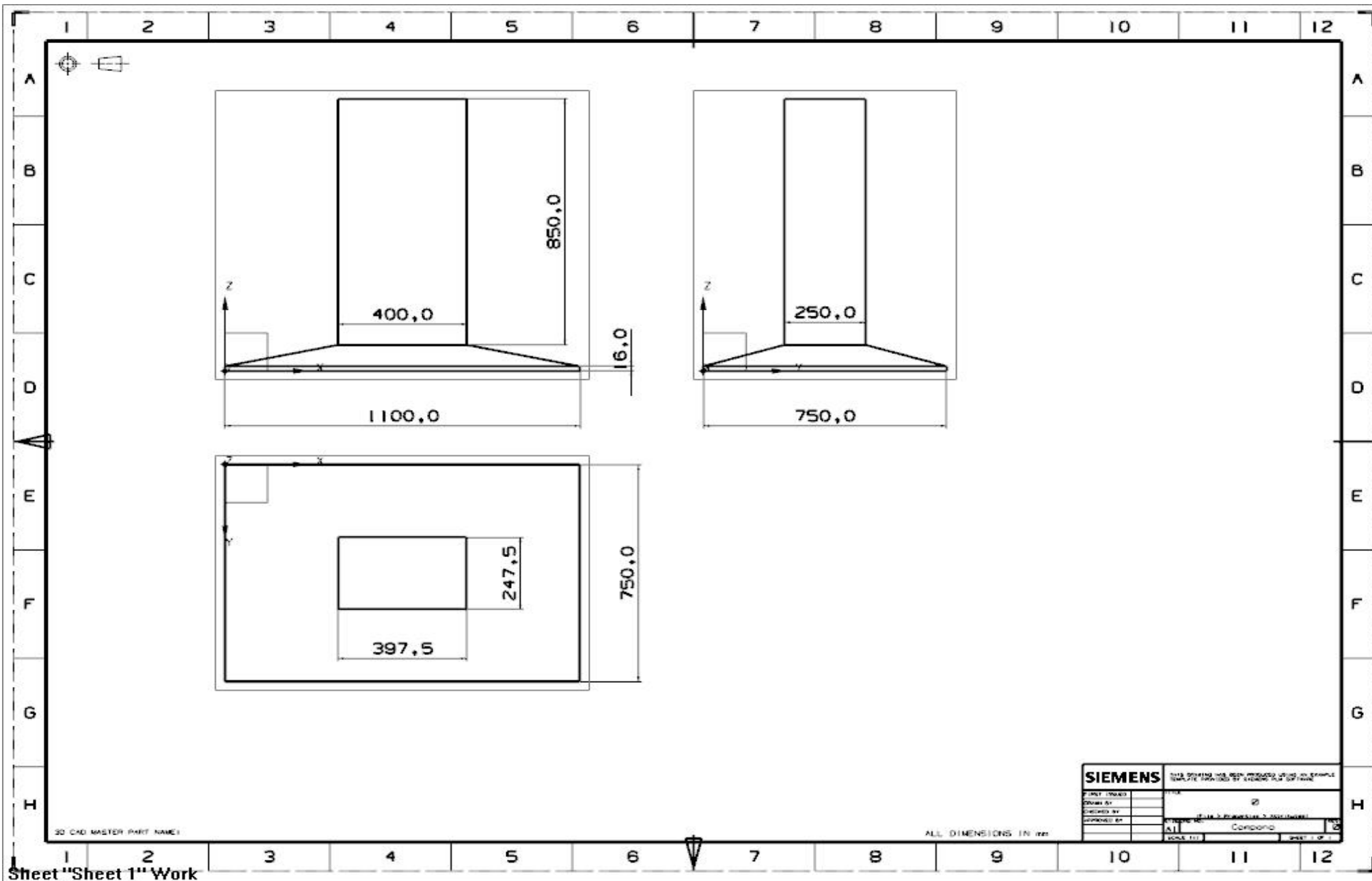


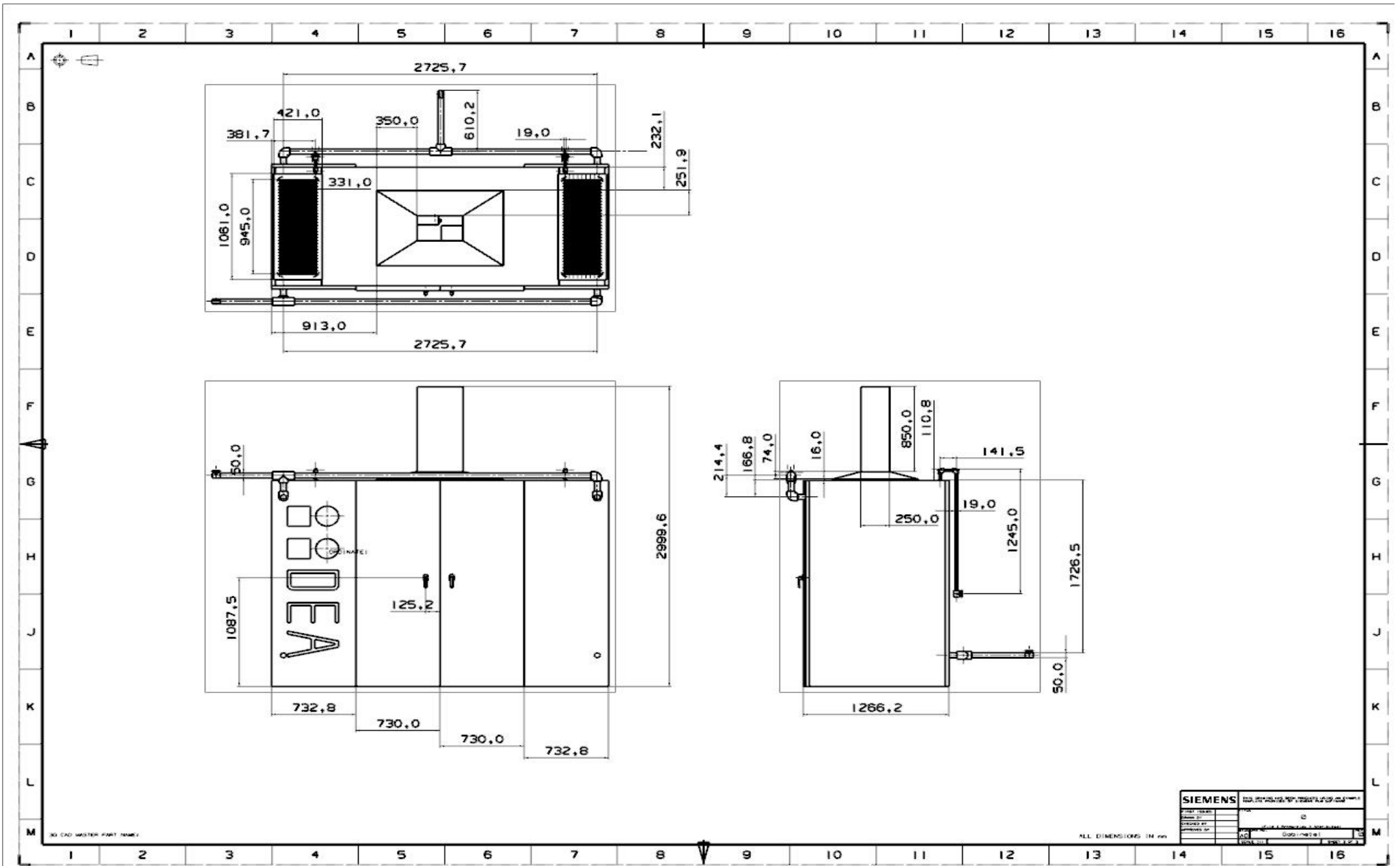


Sheet "Sheet 2nd Work (Out of Date)"









Sheet "Sheet 3" Work

4.4 CONCLUSIONES

Con los elementos finalizados y ensamblados para formar todo el sistema se puede apreciar a detalle este sistema deshidratador de alimentos. Esta última fase de la tesis queda concluida con este dimensionamiento y diseño de prototipo para 85 kg de producto al día, de los cuales sólo se recupera 5.43 % de producto al día, debido al alto contenido de humedad del jitomate, 95%

Debe quedar claro que como primer proceso iterativo de diseño, el prototipo no está exento de ser modificado para futuras iteraciones, satisfaciendo así los requerimientos de diseño y las condiciones operativas necesarias para generar un producto de calidad, apto para su consumo y comercialización. Por ejemplo la temperatura bajo la que se diseñó el deshidratador fue la promedio, por lo que sería necesario hacer dos corridas experimentales con temperaturas a 5°C y a 40 °C, temperaturas extremas que también se llegan a presentar en Ensenada, B.C.

Este trabajo de tesis servirá como base para generar los primeros reportes del CEMIE-Geo. La idea es llevar el seguimiento de este proyecto durante los próximos 4 años, periodo de duración del proyecto, hasta llegar a un prototipo funcional y listo para su comercialización.

Con este trabajo quedan abiertos otros temas de tesis, como el desarrollo de la investigación de las propiedades organolépticas del producto, investigación que nos ayudará a la generación de un manual de uso para diferentes productos orgánicos.

Capítulo 5 Conclusiones

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Para concluir este trabajo es necesario hacer notar lo siguiente:

Con recurso geotérmico a 85 °C y un flujo másico de 2.5 kg/s podemos calentar 2.23 kg/s de agua de 36.5 °C a 80 °C, ganado el agua una cantidad energética de 406.47 kWt; agua que será repartida entre los dos cambiadores de calor de arreglo triangular para ceder 93.4 kWt de energía al aire que ingresa a la cámara de acondicionamiento.

Enfocándonos en un solo cambiador de calor el agua liberará 46.7 kWt, permitiendo que el aire pierda 36% de humedad relativa, entrando a la cámara de secado con 60 °C de temperatura y 16% de humedad relativa. Es muy importante que estas condiciones se mantengan constantes durante todo el proceso de secado, para evitar en menor medida la degradación de sus propiedades organolépticas. A su salida del deshidratador el aire habrá ganado 46% de humedad y perdido 20 °C.

Con tubos aletados de 2 [in] de diámetro y altura de aleta de 3/8 [in] acomodados en forma triangular, se llegó a un número de 120 tubos por cambiador de calor, este equipo térmico tendrá una altura de 1.68 [m], un ancho de 0.36 [m] con 1 [m] de largo. Cabe mencionar que las medidas de los tubos se propusieron en base a tubos comerciales, para no tener problemas en el futuro con la manufactura de dichos, reduciendo así los costos del proyecto.

Considerando las dimensiones anteriores, para un buen ajuste de los cambiadores de calor en los laterales, así como el espacio a ocupar por los cuatro espigueros, el gabinete tendrá 2.06 m de altura, 1.30 m de ancho y 2.90 m de largo. En estas dimensiones se está considerando un recubrimiento de espuma de poliuretano para darle un aislamiento térmico al sistema.

Se optó por ingresar el agua caliente de arriba hacia abajo dentro de los cambiadores de calor, para aprovechar la dinámica del movimiento del agua con el cambio de densidad al ir perdiendo temperatura conforme el paso del aire. Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, en los cambiadores de calor se han colocado estratégicamente tuberías de 3/4 de pulgada, con su respectiva válvula de purga; con la finalidad de extraer todo el aire dentro de los cambiadores de calor, evitando que el sistema trabaje en vacío e ingrese aire a las bombas recirculadoras de agua caliente.

Una consideración muy importante de diseño, la cuál será muy interesante corroborar su efectividad al momento de hacer las primeras pruebas experimentales, es la disposición de los orificios ubicados en los laterales de la cámara de secado; estos se han

especificado para su manufactura con diferente diámetros, yendo de menor a mayor diámetro de abajo hacia arriba respectivamente, esto por la analogía de la disminución de la resistencia al flujo del fluido de una manera gradual a su ascenso, para asegurar una distribución homogénea del aire seco a la entrada de la cámara de secado.

Los principios básicos de la termodinámica y transferencia de calor han sido herramientas muy importantes para el desarrollo de este trabajo, y se ha logrado un diseño, esperando tenga un buen desempeño en campo, para lo cual se consideraron factores climáticos como temperaturas, humedades relativas, salinidad en el ambiente, y uno muy importante, el tipo de alimento a deshidratar, ya que el jitomate por ser un alimento con mucha humedad en su interior (95%) es el alimento con el que el dispositivo operará en estado crítico, por llamarlo de algún modo.

Este proyecto muestra claramente los usos directos de la geotermia de baja entalpía, y con el paso del tiempo se verá en este recurso diversas aplicaciones que pueden ir desde la pasteurización para la fabricación de leche en polvo, el reciclado de papel, secadores de adobes, invernaderos, calefacción e incluso refrigeración para la industria alimentaria, solo por mencionar algunas.

Capítulo 6 Sección de Apéndices

6.1 APÉNDICE A MEMORIA DE CÁLCULO

6.1.1 Balances de masa y energía

$M = M^* \frac{100-H_{ini}}{100-H_{fin}} = 85 \left(\frac{100-95}{100-8} \right) = 4.62 \text{ kg}$ de producto deshidratado obtenido de 85 kg de producto fresco

$$H_{elim} = \frac{H_{ini}-H_{fin}}{100-H_{fin}} H^* = \frac{95-8}{100-8} * (85) = 80.4 \text{ kg de agua a evaporar}$$

La cantidad de energía a suministrar, tomando el valor recomendado de 4,185 kJ por kg de agua evaporada, se tiene:

$$E_{ideal} = 4,185 \text{ kJ}$$

$$\dot{Q} = E_{ideal} * H_{elim} = 4,185 * 80.4 = 336,392 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 93.4 \text{ kW}$$

Se requiere una potencia térmica de 93 kW para deshidratar 85 kg de jitomate.

Para el flujo volumétrico se aplica la ecuación de la energía, se despeja el flujo másico y obtenemos

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{Q}}{Cp_{air}(T_{out} - T_{in})} = \frac{93}{4.193 * (60 - 36.5)} = 3.95 \text{ kg/s}$$

Como se colocarán dos intercambiadores de calor al extremo del deshidratador, la potencia térmica requerida es de la mitad de 93.4 kW, por lo que el flujo másico requerido para transferir 46.7 kW de energía térmica son:

$$\dot{Q}_{a1} = \dot{m}_{a1} Cp_a (T_{a-in} - T_{a-out})$$

$$46.7 = \dot{m}_{a1} 4.193 (80 - 70)$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{46.7}{4.193(80 - 70)} = 1.11 \text{ kg/s}$$

Para el intercambiador de calor de placas planas se considera un pinch de acercamiento de 5 °C, el recurso geotérmico ingresa a 85 °C y el agua desmineralizada entra a 36.5 °C. Con los siguientes datos se plantea:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{geo} C_{p_{geo}} (T_{geo-in} - T_{geo-out}) = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{a-out} - T_{a-in})$$

$$\dot{Q} = (2.5)4.31(85 - T_{geo-out}) = (2.23)4.193(80 - 5)$$

$$(2.23)4.193(80 - 5) = 406.47 \text{ kW}$$

$$T_{geo-out} = 85 - \frac{406.47}{10.775}$$

$T_{geo-out} = 47 \text{ °C}$ Temperatura del recurso geotérmico a la salida del intercambiador de calor de placas planas

6.1.2 Velocidad en la tubería

Se considera una tubería aletada con un diámetro interno de 47.5 mm, un diámetro externo de 50 mm y un diámetro de aleta de 69.1 mm.

$$\dot{m}_{a1} = V_a A_{in} \rho_a$$

$$V_a = \frac{\dot{m}_{a1}}{A_{in} \rho_a} = \frac{1.11}{(1.77E - 03)(974.9)} = 0.64 \text{ m/s}$$

6.1.3 Área de transferencia de calor requerida

Como se mencionó anteriormente el método bajo el cual se diseñó este cambiador de calor es con el de Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{ml}$$

6.1.3.1 Diferencia de temperaturas media logarítmica

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Donde:

$$\Delta T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = 26.17 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calculando el factor de corrección F:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{60 - 36.5}{80 - 36.5} = 0.54$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{80 - 70}{60 - 36.5} = 0.426$$

Del gráfico obtenemos que F es 0.949

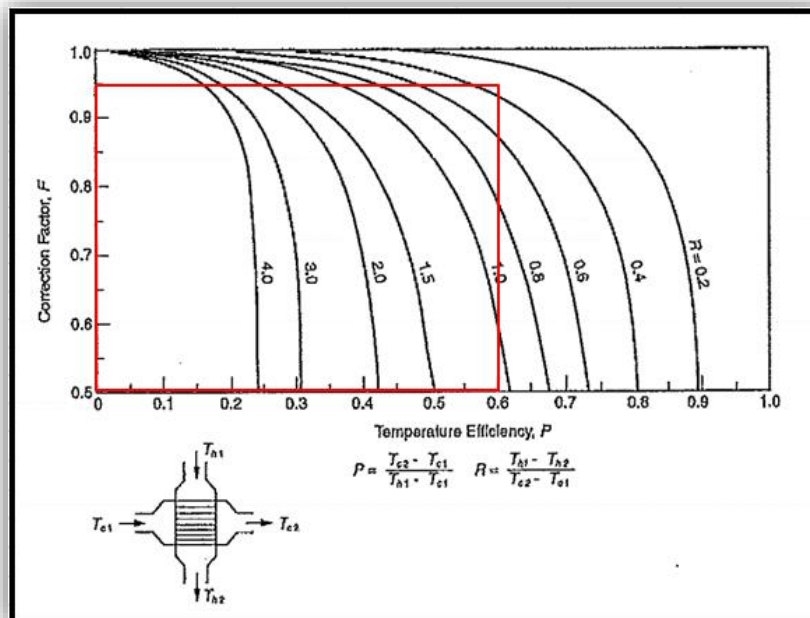


Ilustración 6-1 Diagrama del factor de corrección F para intercambiadores de calor comunes de tubos y coraza de flujo cruzado

Por lo que

$$\Delta T_{ml} = 24.84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6.1.3.2 Coeficiente global de transferencia de calor

$$\frac{1}{U} = R_{TOTAL} = R_{conv,1} + R_{f,i} + R_{cil} + R_{f,o} + R_{conv,2}$$

$$R_{TOTAL} = \frac{1}{h_1} + R_{f,i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L_1 k_1} + R_{f,o} + \frac{1}{h_2}$$

Donde $R_{f,i}$ y $R_{f,o}$ son las resistencias térmicas asociadas a las incrustaciones por el agua y por el aire.

El siguiente paso es determinar los coeficientes convectivos del agua y del aire, para ello es necesario suponer un área de transferencia de calor, la cual es la que precisamente se quiere determinar, posteriormente se hará un proceso iterativo para esta variable hasta que converja.

6.1.3.2.1 Coeficiente convectivo para el agua (flujo interno en tuberías)

| | | |
|---|---------|-------------------|
| Área de Paso Fluido | 0.00177 | [m ²] |
| Perímetro Mojado | 0.14923 | [m] |
| Diámetro Hidráulico | 0.0475 | [m] |
| Flujo por unidad de conducción (tubo haz) | 0.00930 | [kg/s] |
| Velocidad media | 0.00538 | [m/s] |

$$Re_D = \frac{\rho_a V_a D_H}{\mu_a} = \frac{974.9 * 0.0122 * 0.0355}{3.78E - 4}$$

$$Re_D = 660$$

El factor de fricción será de

$$f = 64/Re \text{ para } Re < 2000; \text{ Esto es } f = 0.09702$$

El número de Prandtl para las características del fluido es de $Pr = 2.375$

El coeficiente convectivo que nos interesa, es el coeficiente convectivo corregido, el cual se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$h_1 = \frac{\left[\left(h_2 * (1/R_{f,o}) \right) / \left((1/R_{f,o}) + h_2 \right) \right] * (A_o + \eta_{fin} * A_{fin})}{A_{paso,f}} = 86,541 \text{ W/m}^2 * \text{K}$$

6.1.3.2.2 Coeficiente convectivo para el aire (flujo externo en tubería)

Se consideran los siguientes parámetros

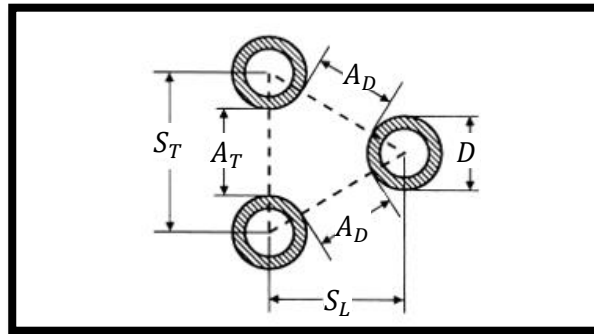


Fig. 6.1 Celda unitaria de un arreglo triangular

Por regla de diseño se considera que

$$S_T = 1.05 \phi_{fin}; S_L = S_T * \cos(60^\circ/2)$$

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2}; A_1 = S_T L; A_T = (S_T - D)L; A_D = (S_D - D)L.$$

$$S_T = 0.073 \text{ [m]}; S_L = 0.073 \text{ [m]}; S_D = 0.073 \text{ [m]};$$

$$A_1 = 0.073 \text{ [m]}; A_T = 0.023 \text{ [m]}; A_D = 0.023 \text{ [m]}.$$

Datos geométricos:

Se propone un número de columnas, máximo 5, se requiere un número de 120 tubos²². Con estos dos datos podemos realizar el siguiente consiente para determinar el número de filas $(120/(5 + (5 - 1))) * 2 = 26.63 \approx 27$ filas

$$\text{Ancho del haz de tubos } L_2 = (\#columnas + 1) * S_T/2 = 0.3625 \text{ [m]}$$

$$\text{Longitud del tubo } L_1 = 1.00 \text{ [m]}$$

Área de paso del fluido

$$A_{paso.f} = (L_2 * L_1) - \phi_{out} * L_1 * 3 - 3 * (\phi_{fin} - \phi_{out}) * e_{fin} * \#fin * L_1$$

$$A_{paso.f} = 0.0994 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Flujo frontal} = L_1 * L_2 = 0.3625 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Área tubo desnudo} = \pi * \phi_{out} * (L_1 - e_{fin}) * \#fin * L_3 = 0.1354 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Área aletas} = (\pi/4) * (\phi_{fin}^2 - \phi_{out}^2) * 2 * \#fin * L_1 = 1.4036 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Área total} = 1.5390 \text{ [m}^2\text{]}$$

Perímetro proyectado

$$P_p = 2 * (\phi_{fin} - \phi_{out}) * \#fin * L_1 + 2 * (L_1 - e_{fin}) * (\#fin * L_1) = 16.736 \text{ [m]}$$

$$\text{Diámetro para transferir calor } D_e = \frac{(2 * A_{Total})}{(\pi * P_p)} = 0.059 \text{ [m]}$$

$$\text{Diámetro equivalente de fricción } D_f = (4 * VLN) / A_{Total} = 0.030 \text{ [m]}$$

$$\text{Volumen Libre Neto; } VLN = (L_2 * L_1 * S_L) - (\pi/4) \phi_{out}^2 * L_1 * 3 - (\pi/4) * (\phi_{fin}^2 - \phi_{out}^2) * e_{fin} * L_1 * 3 = 0.0117 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Masa velocidad } G_s = \dot{m}_{air} / A_{paso.f} = 19.85 \text{ [kg m}^2\text{/s]}$$

$$\text{Número de Reynolds} = 59,289$$

$$\text{Número de Reynolds } \Delta P = 30,839$$

²² Para este punto ya se propuso un área total requerida en el intercambiador de calor, la cual fue de utilidad para el cálculo del número total de tubos requeridos. El resultado presentado en este trabajo es el resultado final después de una serie de iteraciones. Más adelante se mostrarán los cálculos asociados al área de transferencia de calor y el total de tubos requeridos para su construcción.

Correlación de Jameson $J_h=261.80$

Coefficiente convectivo externo = $106.88 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Eficiencia de aleta

$$m = \sqrt{2h/ke_{fin}} = 56.13$$

$$H = \frac{\phi_{fin} - \phi_{out}}{2} = 0.009525$$

$$Y = \frac{H + e_{fin}}{2} * \left(1 + 0.35 * \ln(\phi_{fin}/\phi_{out})\right) = 0.00549535$$

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh(m*Y)}{m*Y} = 0.97$$

Coefficiente convectivo real = $106.88 * 0.96 = 103.62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Con los coeficientes convectivos calculados retomamos la siguiente expresión:

$$R_{TOTAL} = \frac{1}{h_1} + R_{f,i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + R_{f,o} + \frac{1}{h_2}$$

Como $R_{f,i}$ y $R_{f,o}$ se consideró $0.0002 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$ y $0.0004 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$ respectivamente²³

Sustituimos y se obtiene

$$R_{TOTAL} = 0.0103 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

Con la información calculada anteriormente de la ecuación que se plantea; despejamos.

$$A_s = \frac{\dot{Q}_{in}}{U\Delta T_{ml}} = 18.83 \text{ [m}^2\text{]}$$

Área por tubos: $0.1571 \text{ [m}^2\text{]}$

²³ (Cengel & Ghajar, 2011) Tabla 11-2 p. 636

6.1.4 Cálculo de pérdida de carga

Densidad aire de entrada: $\rho_{air.in} = 1.3501 \text{ kg/m}^3$

Densidad aire de salida: $\rho_{air.out} = 1.1501 \text{ kg/m}^3$

Densidad media $\bar{\rho}_{air} = 1.2501 \text{ kg/m}^3$

Densidad en el ventilador $\rho_{fan} = 1.1501 \text{ kg/m}^3$

Factor de fricción: $f_f = 1.276 * (D_f^{-0.14}) = 2.080$

Diferencial de presión $\Delta P = \frac{f_f * G_s^2 * S_L * \#filas}{2\bar{\rho} * D_f} * (D_f/S_T)^{0.4} * (S_L/S_T)^{0.6} = 10.96 \text{ kPa}$

Velocidad ventilador $V_{fan} = (4 * m_{air}) / (\rho_{fan} * \#fan * \pi * \phi_{fan}^2) = 2.184 \text{ m/s}$

Presión de velocidad $P_{speed} = \frac{\rho_{fan}}{2} * V_{fan}^2$

Potencia en el ventilador $\dot{W}_{fan} = (\Delta P * m_{air} / \bar{\rho}_{air}) = 17.29 \text{ kW}$

Pérdida en tuberías $\Delta P_{pipe} = f_f * (L_1 / \phi_{out}) * ((\rho_a * V_a^2) / 2) = 0.027 \text{ Pa}$

Constante por accesorios $C_{pipe} = 3$

Pérdida por accesorios $\Psi = C_{pipe} * \vec{g} * \rho_a$

Pérdida total en tubos de agua $\Psi_{Total} = (\Delta P_{pipe} + \Psi) / 1000 = 28.7 \text{ kPa}$

6.1.5 Datos geométricos del intercambiador de calor

$L_1 = 1.00 \text{ [m]}$

$L_2 = 0.363 \text{ [m]}$

$L_3 = 1.682 \text{ [m]}$

Volumen de unidad $Vol_{inte} = 0.61 \text{ [m}^3\text{]}$

Área de intercambio $A_s = 18.83 \text{ [m}^2\text{]}$

Densidad de área $\rho_{\acute{a}rea} = A_s / Vol_{inte} = 104.77$

Caída de presión total en tuberías de agua $\Psi_{Total} = 28.7 \text{ kPa}$

Caída de presión total en banco de tubos de aire $\Delta P = 18.19 \text{ kPa}$

Unidades de Transferencia térmica $NTU=(U * A_s)/C_{min} = 946$

Donde $C = C_{min}/C_{máx} = (\dot{m}Cp)_{min}/(\dot{m}Cp)_{máx}$

$$C = \dot{m}_a C p_a = 1.11 * 4.193 = 4.654 \text{ kW/K}$$

$$C = \dot{m}_{air} C p_{air} = 1.97 * 1.008 = 1.986 \text{ kW/K}$$

$$C_{min} = 1.986 \text{ kW/K}$$

$$C_{máx} = 4.654 \text{ kW/K}$$

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{máx}} = \frac{1.986}{4.654} = 0.4267$$

Efectividad de intercambiador $\varepsilon = 90.5\%$

$$\varepsilon = (1 - \exp(-1/C^*)) * 100 = 90.5$$

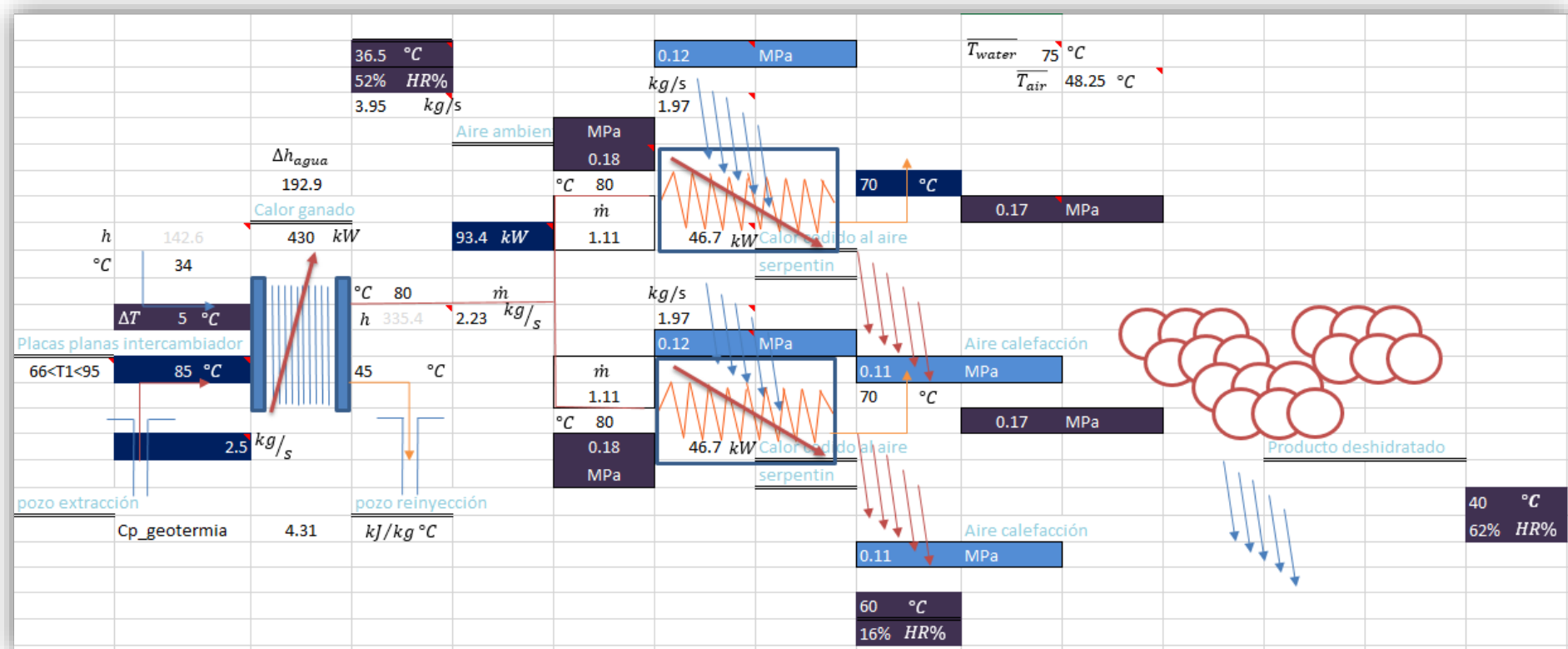


Fig. 6.2 Representación gráfica de los balances de masa y energía.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Bejan, G. T. (1996). *Thermal Design and optimizati3n*. John Wiley & Sons.
- ADEME y BRGM. (s.f.). *geothermie-perspectives*. Recuperado el 20 de 08 de 2013, de geothermie-perspectives: <http://www.geothermie-perspectives.fr>
- Aguilar, C. y. (1966). Journal of Agricultural Engineering Research. En C. y. Aguilar, *Temperature ratios for measuring efficiency and for the control of dryers*. (págs. 19-23).
- Alejandro, B. Z. (2009). *Tesis: Deshidratador de tomates utilizando energía geotérmica para ensenada B.C*. México D.F.
- Asociación Geotérmica Mexicana. (s.f.). *geotermia*. Recuperado el 06 de 09 de 2013, de geotermia: http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688
- Breve historia de la energía geotérmica. (s.f.). En G. L. Trillo, *Guía de la Energía Geotérmica* (pág. 26.34). Madrid: La Suma de Todos.
- Budynas, R. G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México: McGrawHill.
- Cortés, D. F. (2013). Informe Curso Isotermias Secado UNAM. *Curso Taller de Secado Solar*, (págs. 1-9). Temixco, Morelos.
- Cruz, A. (02 de 12 de 2010). *cronica*. Recuperado el 16 de 08 de 2013, de cronica.: <http://www.cronica.com.mx/notas/2010/547535.html>
- Energy Education Group. (2003). Renewable Energy Source: Geothermal. En D. P. MArilyn Nemezer, *Energy for Keeps:Electricity from Renewable Energy* (pág. 31). California, EE.UU.
- Fanelli, M. H. (s.f.). *geothermal-energy*. Recuperado el 04 de 09 de 2013, de geothermal-energy: http://www.geothermal-energy.org/print/geothermal_energy/que_es_la_energia_geotermica.html
- Figueroa, D. I. (2013). Curso de Tecnologías de Secado Solar/Elementos Básicos de Psicrometría. *Curso Taller de Secado Solar* (pág. 6). Temixco; Morelos: IER.
- Finck-Pastrana, M. A. (2013). Curso de Actualización. *Curso Taller de Secado Solar*. Temixco, Morelos: IER.

- Flores, A. P. (12 de 10 de 2009). *elempresario*. Obtenido de *elempresario*:
<http://elempresario.mx/nuevos-mercados/alimentos-organicos-puerta-europa>
- Geo-Heat Center. (06 de 02 de 2012). *geoheat.oit.edu*. Recuperado el 11 de 09 de 2013, de *geoheat.oit.edu*: <http://geoheat.oit.edu/>
- geotermia*. (2007-2013). Recuperado el 10 de 08 de 2013, de *geotermia*:
http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688
- Geothermal energy association. (01 de 06 de 2013). *geo-energy*. Recuperado el 10 de 08 de 2013, de *geo-energy*: <http://www.geo-energy.org/currentUse.aspx>
- Geothermal Energy Association. (s.f.). *geo-energy*. Recuperado el 19 de 08 de 2013, de *geo-energy*: <http://geo-energy.org/potentialUse.aspx>
- geothermalenergy*. (s.f.). Recuperado el 04 de 06 de 2012, de *geothermalenergy*:
<http://www.gothermalenergy.org>
- Gobierno de Mexicali. (04 de 05 de 2014). *mexicali.gob.mx*. Obtenido de *mexicali.gob.mx*: <http://www.mexicali.gob.mx/EA07BB69-7ABF-470F-9438-D38EFF6C65CF/FinalDownload/DownloadId-997EC0855229B51090B250D30B7E8109/EA07BB69-7ABF-470F-9438-D38EFF6C65CF/transparencia/administracion/atlas/pdf/2.pdf>
- González, I. I. (06 de 04 de 2014). *www.elfinanciero.com.mx*. Obtenido de *www.elfinanciero.com.mx*: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/planta-geotermica-en-bc-sigue-explorando-tierras-1.html>
- Goribar, I. E. (1984). Características de la Mezcla Vapor Aire. En E. H. Goribar, *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*. México: Limusa.
- Hernández, C. (Ed.). (02 de 12 de 2012). *elmundo*. Recuperado el 08 de 09 de 2013, de *elmundo*:
<http://www.elmundo.es/elmundo/2012/11/29/internacional/1354176786.html>
- IDAE; IGME. (2008). Usos térmicos. En I. p. Energía, & I. G. España, *Manual de geotermia* (pág. 68). Madrid: IDAE.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas. (2010). *IIE*. Recuperado el 10 de 09 de 2013, de *IIE*: <http://www.iie.org.mx/sitioIIE/sitio/control/06/detalle1.php?id=207>
- Jaimes, O. G. (2008). Recursos Geotérmicos. En O. G. Jaimes, *Los recursos geotérmicos de baja entalpía: una opción en la generación eléctrica y la desalación de agua de mar* (pág. 7). México D.F.: Tesis licenciatura.

- Lagunas, D. L. (2013). Actividad de Agua. *Curso Taller de Secado Solar*, (pág. 3). Temixco, Morelos.
- Pérez., J. D. (2007). *Análisis Teórico-Experimental de un deshidratador solar combinado (Térmico-Fotovoltaico) para el tratamiento de arroz*. Temixco, Morelos: CIE.
- R. F, B. (1987). *Design analysis of Thermal Systems*. John Willey & Sons.
- RT sepa más. (02 de 02 de 2014). *actualidad.rt.com/*. Obtenido de *actualidad.rt.com/*:
<http://actualidad.rt.com/ciencias/view/118727-islandia-saca-jugo-volcan-energia-magma>
- Sekulic, R. K. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons.
- Ser Turista. (07 de 03 de 2014). *serturista.com/*. Obtenido de *serturista.com/*:
<http://serturista.com/islandia/myvatn-relajacion-en-paisajes-volcanicos/>
- Servín, F. C. (29 de julio de 2012). La paradoja alimentaria. Sin precedente, hambre y despilfarro de comida. *La Jornada*, pág. 2.
- Trejo, J. V. (s.f.). Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB). *Seminario de Investigación: Fenómenos de Superficie, Posgrado en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México*. México, Ciudad Universitaria; D.F.
- U., M. P. (13 de 03 de 2014). <http://www.jornada.unam.mx/>. Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx/>:
<http://www.jornada.unam.mx/2014/03/13/politica/020n1pol>
- Vidaña, M. E. (2013). Notas de Cinética de Secado. *Curso Taller de Secado Solar*. Temixco, Morelos: IER.
- W.F, S. (1989). *Design of Thermal Systems*. McGraw-Hill.