



# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RECUPERADOR DE CALOR DE DESECHO PARA UN COMPRESOR DE LA EMPRESA CAJAPLAX UTILIZANDO TUBO TERMOSIFÓN BIFÁSICO**

BAJO LA OPCIÓN I:  
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:  
ING. OSCAR ISLAS ORTIZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ABDIEL GÓMEZ MERCADO

SINODALES:  
DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA  
DR. CELERINO RESÉNDIZ ROSAS

64 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo Septiembre de 2019.





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

**División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica  
ACTA**

Siendo las 13:00 horas del 15 de febrero de 2019, reunidos en el aula U6, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Diseño y construcción de un recuperador de calor de desecho para un compresor de la empresa Cajaplast utilizando tubo termosifón bifásico, con el siguiente contenido:

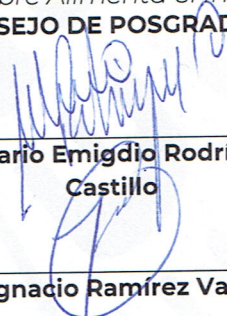
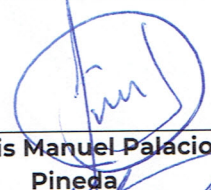

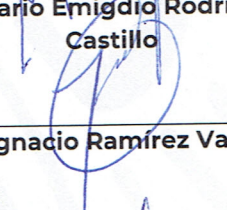
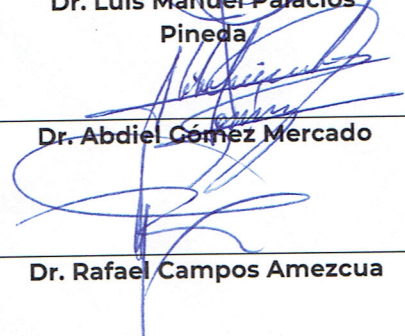

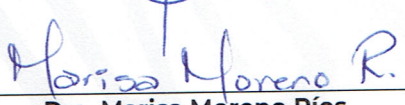
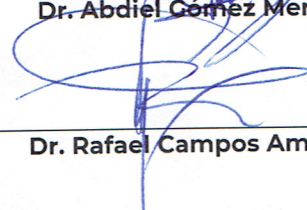
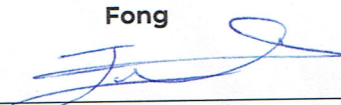
- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1. Introducción
- 2. Antecedentes
- 3. Marco Teórico
- 4. Materiales y métodos
- 5. Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Óscar Islas Ortiz obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Abdiel Gómez Mercado, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*

**EL CONSEJO DE POSGRADO**

 <b>Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo</b>	 <b>Dr. Luis Manuel Palacios Pineda</b>	 <b>Dra. Erika Osiris Ávila Dávila</b>
 <b>Dr. Ignacio Ramírez Vargas</b>	 <b>Dr. Abdiel Gómez Mercado</b>	 <b>Dr. Hugo Francisco Abundis Fong</b>
 <b>Dra. Marisa Moreno Ríos</b>	 <b>Dr. Rafael Campos Amezcua</b>	 <b>Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas</b>





Instituto Tecnológico de Pachuca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Pachuca, Hidalgo, **20/Agosto/2019**  
OFICIO No. DEPI-186-19

**C. ING. ÓSCAR ISLAS ORTIZ  
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

"Diseño y construcción de un recuperador de calor de desecho para un compresor de la empresa Cajaplast utilizando tubo termosifón bifásico"

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*



**SEP**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**MTRA. KARLA MARTÍNEZ TAPIA**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Archivo  
KMT/lmpp



## DEDICATORIAS

*El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, por ser el principio y fin de todo cuanto existe.*

*A mí mamá que es a quien le debo todo cuanto soy, gracias a su amor y cariño me demostró que, aunque el camino sea tortuoso al final la recompensa será mayor.*

*A mí familia por ser el motor que me impulsa a ser mejor cada día y gracias a su apoyo incondicional me motivan a dar mi mejor esfuerzo para el logro de mis objetivos.*

*A mis amigos y compañeros quienes con su apoyo y palabras de aliento me motivaron a seguir siempre adelante.*

*A mis hermanos por su confianza y apoyo incondicional que con esfuerzo y dedicación me han demostrado que todos los sueños son alcanzables.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado, a la empresa Cajaplax por la ayuda otorgada para mi formación profesional a lo largo de estos años y poder así culminar la presente tesis. A la empresa Metal Mecánica por su esfuerzo y dedicación en la construcción de este proyecto. De igual manera a los doctores Abdiel Gómez, Celerino Reséndiz, Luis Palacios, por la dedicación y apoyo que han brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas, así como su dirección y guía. Gracias por la confianza ofrecida desde mi llegada a la institución. Asimismo, agradezco a mis compañeros y amigos que me acompañaron a lo largo de este proceso de mi vida. A todos ¡Muchas Gracias!

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolla como una necesidad de reducir el consumo energético de hidrocarburos y aprovechar al máximo los recursos de la empresa Cajaplax S.A. de C.V., una de las necesidades sociales de las empresas es proveer instalaciones seguras y servicios de calidad para sus empleados; actualmente la empresa utiliza gas Butano para mantener la temperatura adecuada del agua destinada para uso sanitario. Durante un recorrido en la empresa se observa la generación de calor de desecho en un compresor reciprocante. El calor generado durante la compresión de aire, es energía calorífica que debe ser retirada del equipo de compresión para poder ser utilizado en los sistemas neumáticos, este proceso de retiro de calor lo realizan utilizando torres de enfriamiento que emiten el calor retirado del aire comprimido al medio ambiente en forma de vapor de agua. esto es lo que motivo investigar y diseñar un equipo que permita captar ese calor latente que se genera como desecho en el proceso de compresión del aire y poder utilizarlo para mantener la temperatura de agua destinada para uso sanitario dentro de un rango adecuado para su uso (22°C a 32°C). El aprovechamiento del potencial térmico desechado por el aire comprimido puede ser utilizado en un recuperador de calor como lo es un intercambiador de calor basado en tecnología de cambio de fase utilizando tubos termosifones que sean capaces de absorber la mayor cantidad de calor latente proveniente del aire comprimido y suministrarlo al agua fría para alcanzar una temperatura de uso que va de los 22°C a 32°C para uso sanitario. El objeto de estudio del presente trabajo es buscar y desarrollar un equipo destinado a la captación de calor latente generado en el proceso de compresión de aire con un intercambiador de calor compacto utilizando como tecnología Tubos Termosifones Bifásicos; de esta manera aportar al desarrollo de aplicación de tubos termosifones bifásicos en la tecnología de recuperadores de calor compactos y eficientes para lo cual se presenta un diseño asistido por computadora (CAD) de recuperador de calor con Tubos Termosifones Bifásicos (TTB) para su construcción y evaluación en campo, teniendo presente condiciones iniciales como: temperatura, presión, volumen, área disponible, flujo, etc.

El trabajo será desarrollado de la siguiente manera: primero se abordará una presentación de los Tubos Termosifones Bifásicos, de forma individual y en conjunto en un intercambiador de calor, así como su desempeño térmico, posterior se describirá la base tecnológica del comportamiento térmico de los Tubos Termosifones encontrada durante la revisión bibliográfica de libros y artículos técnicos, después se abordará una explicación más a detalle de los procesos y límites de operación de los Tubos Termosifones Bifásicos en un intercambiador de calor, daremos seguimiento a las condiciones a que será sometido nuestro recuperador de calor y se realizará el cálculo del intercambiador de calor con Tubos Termosifones Bifásicos para determinar dimensiones, materiales de construcción, número de tubos termosifones, etc. necesarios para elevar la temperatura de agua destinada para uso sanitario a la temperatura propuesta de 22°C a 32°C.

Este proyecto pretende tener un impacto tecnología en la aplicación de Tubos Termosifones Bifásicos como recuperadores de calor compactos, mejorar la eficiencia en el uso del equipo de compresión, evitar el consumo de hidrocarburos, mantener el confort del personal, ahorro de agua de enfriamiento y energía eléctrica.

## ABSTRACT

This work is developed as a need to reduce hydrocarbon energy consumption and make the most of the resources of Cajaplax S.A. de C.V., one of the social needs of companies is to provide safe facilities and quality services for their employees; The company currently uses Butane gas to maintain the proper temperature of the water destined for sanitary use. During a tour in the company the generation of waste heat is observed in a reciprocating compressor. The heat generated during the compression of air, is heat energy that must be removed from the compression equipment to be used in pneumatic systems, this heat removal process is done using cooling towers that emit the heat removed from the compressed air to the Environment in the form of water vapor. This is what motivated to investigate and design a device that allows to capture that latent heat that is generated as waste in the air compression process and be able to use it to maintain the temperature of water destined for sanitary use within a range suitable for its use (22 ° C to 32 ° C). The use of the thermal potential discarded by compressed air can be used in a heat recuperator such as a heat exchanger based on phase change technology using thermosiphon tubes that are capable of absorbing as much latent heat from the compressed air and supply it to the cold water to reach a temperature of use that goes from 22 ° C to 32 ° C for sanitary use. The object of study of the present work is to look for and develop an equipment destined to the capture of latent heat generated in the process of air compression with a compact heat exchanger using as technology Biphasic Thermosiphon Tubes; in this way contribute to the development of application of two-phase thermosiphon tubes in the technology of compact and efficient heat recuperators for which a computer-aided design (CAD) of heat recovery with Biphasic Thermosiphon Tubes (TTB) is presented for its construction and field evaluation, taking into account initial conditions such as: temperature, pressure, volume, available area, flow, etc.

The work will be carried out in the following way: first, a presentation of the Biphasic Thermosiphon Tubes will be addressed, individually and together in a heat exchanger, as well as its thermal performance, later the technological base of the thermal behavior of the Tubes will be described. Thermosiphons found during the literature review of books and technical articles, then a more detailed explanation of the processes and operating limits of the Biphasic Thermosiphon Tubes in a heat exchanger will be addressed, we will monitor the conditions to which our recuperator will be subjected to heat and the calculation of the heat exchanger with two-phase thermosiphon tubes will be carried out to determine dimensions, construction materials, number of thermosiphon tubes, etc. necessary to raise the temperature of water intended for sanitary use to the proposed temperature from 22 ° C to 32 ° C.



This project aims to have a technology impact in the application of Biphasic Thermosiphon Tubes as compact heat recuperators, improve the efficiency in the use of compression equipment, avoid the consumption of hydrocarbons, maintain staff comfort, save water cooling and energy electric.

---

# ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIAS</b> .....	I
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	II
<b>RESUMEN</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	V
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	VII
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IX
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	X
<b>NOMENCLATURA</b> .....	XI
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	1
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	1
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	2
<b>5. ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>6. MARCO TEORICO</b> .....	5
<b>A. Ciclo termodinámico</b> .....	6
<b>B. Diseño CAD</b> .....	11
<b>C. COSMOSMotion®</b> .....	11
<b>D. COSMOSXpress®</b> .....	11
<b>E. COSMOSWorks®</b> .....	12
<b>F. COSMOSFlowWorks®</b> .....	12
<b>G. Ecuaciones de diseño para tubos termosifones bifásicos</b> .....	12
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	17
<b>7.1 Procedimientos de aplicación</b> .....	18
<b>7.2 Procesamiento y análisis de la información</b> .....	18
<b>A. Diseño de encuesta</b> .....	19
<b>B. Resultados de la encuesta</b> .....	20
<b>C. Conclusiones de la encuesta</b> .....	22
<b>D. Resultados de presión y temperatura del compresor</b> .....	22
<b>E. Resultados de la temperatura del agua</b> .....	23
<b>F. Balance de energía</b> .....	23
<b>H. Diseño CAD de tubos termosifones</b> .....	28
<b>I. Diseño CAD de la coraza</b> .....	32

---

<b>J. Simulación en software Aspen Exchanger Desing &amp; Rating V9 .....</b>	<b>42</b>
<b>PROCESO DE FABRICACIÓN TTB.....</b>	<b>46</b>
<b>PROCESO DE FABRICACIÓN DE CORAZA.....</b>	<b>49</b>
<b>PROCESO DE ENSAMBLAJE.....</b>	<b>50</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>56</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Descripción de un Tubo Termosifón bifásico (TTB) .....	4
Figura 2 Tubo Termosifón Bifásico (TTB) Ciclo termodinámico .....	5
Figura 3 Ciclo termodinámico del termosifón bifásico en un diagrama T-S .....	6
Figura 4 Esquema de las resistencias térmicas en un termosifón .....	9
Figura 5 Instrumentos de medición (Medidor de temperatura digital, medidor de temperatura de presión, manómetro de burdon, tablero de medición de compresor) .....	17
Figura 6 Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa, TEMA. ....	25
Figura 7 Aceros para recipientes a presión .....	26
Figura 8 Tubo termosifón.....	28
Figura 9 Válvula.....	29
Figura 10 Tapón .....	30
Figura 11 Tubo .....	31
Figura 12 Coraza .....	32
Figura 13 Cabezal.....	33
Figura 14 Cabezal.....	34
Figura 15 Deflectores .....	35
Figura 16 Deflectores .....	36
Figura 17 Espejo.....	37
Figura 18 Coraza .....	38
Figura 19 Ensamblaje de recuperador de calor .....	39
Figura 20 Ensamblaje de recuperador de calor .....	40
Figura 21 Ensamblaje de recuperador de calor .....	41
Figura 22 Cuadro de desempeño del recuperador de calor .....	42
Figura 23 Fotografía medición de temperatura .....	53
Figura 24 Fotografía de pantalla de medición de temperatura.....	53
Figura 25 Diagrama de toma de temperatura .....	54

---

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de fases del ciclo termodinámico de un Tubo Termosifón Bifásico (TTB) ...	6
Tabla 2 Resultados de encuesta.....	21
Tabla 3 Temperatura °F.....	22
Tabla 4 Presión en bar.....	22
Tabla 5 Temperatura en °C.....	23
Tabla 6 Materiales de fabricación de TTB.....	44
Tabla 7 Materiales de fabricación de coraza.....	45
Tabla 8 Proceso de fabricación de TTB.....	48
Tabla 9 Proceso de fabricación de coraza.....	50
Tabla 10 Proceso de ensamblaje.....	52

## NOMENCLATURA

A	Área	$m^2$	
as	Área de flujo lado coraza	$m^2$	
at	Área de flujo lado tubos	$m^2$	
B	Espacio de deflectores	m	
C	Factor de Coulburn		
Cp	Poder calorífico fluido caliente	J/kg K	
Cp	Poder calorífico fluido frío	J/kg K	
De	Diámetro exterior de la coraza	m	
Di	Diámetro interior de la coraza	m	
d	Diámetro nominal	m	
di	Diámetro interior de los tubos	m	
do	Diámetro exterior de los tubos	m	
f	Factor de fricción		
Ft	Factor de corrección de temperatura		
g	Aceleración de la gravedad	$m/s^2$	
Gs	Velocidad másica de corza	m/s	
Gt	Velocidad másica de los tubos	m/s	
hio	Coeficiente de transferencia referido al diámetro exterior del tubo		$K \text{ Cal/hr} \cdot m^2 \cdot ^\circ k$
ho	Coeficiente de transferencia referido al diámetro		$K \text{ Cal/hr} \cdot m^2 \cdot ^\circ k$
L	Longitud	m	
N	Número de deflectores en la coraza		
nt	Número de pasos por el lado tubos		

ns	Número de pasos lado coraza	
Ntu	Número de Nusslt	
Nt	Número de tubos	
Pt	Pasos de los tubos	
Q	Flujo de calor	kJ
Rdi	Factor de obstrucción interior	
Rdo	Factor de obstrucción exterior	
Rd	Factor de obstrucción total	

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como parte de las obligaciones de la empresa es proveer un lugar destinado para el aseo del personal y que este cuente con los servicios adecuados para lo cual es destinado, uno de los servicios es el suministro de agua sanitaria a una temperatura adecuada para su uso ( $22^{\circ}$  a  $32^{\circ}\text{C}$ ), dentro de los requerimientos esta también que las instalaciones sean seguras y uno de los puntos de riesgo de mayor impacto es el contenedor de gas butano necesario para el suministro de combustible que se utiliza para calentar el agua sanitaria, así como el cumplimiento con la Secretaria del Trabajo y Previsión Social (STPS) en materia de seguridad de las instalaciones y servicios.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El principio de conservación de la energía expresado en la primera ley de la termodinámica establece que la energía no puede ser creada o destruida; solamente se transforma. La mayoría de los procesos industriales, en específico el proceso para la compresión de aire son generadores de calor de desperdicio. Es decir, los procesos al no ser idealmente reversibles sino irreversibles, destruyen exergía y generan entropía (segunda ley de la termodinámica). La reducción de estos efectos constituye un reto tanto para mejorar los procesos como para desarrollar nuevos y mejores equipos.

Se visualiza que un gran aporte en el manejo de la transferencia de calor en el futuro está asociado a los procesos y dispositivos de transferencia de calor con cambio de fase dado los altos coeficientes de transferencia de calor involucrados en los TTB ofrecen oportunidades realmente atractivas para la captación de calor residual por el proceso de compresión de aire.

Como el proceso de compresión requiere energía para incrementar la presión del aire y este al ser sometido a compresión eleva su temperatura (proceso exotérmico). El calor debe ser removido del equipo y del aire comprimido para mantener una temperatura adecuada de operación y uso respectivamente.

El empleo de equipos para el intercambio térmico es necesario para retirar el calor latente en el aire y equipo de compresión, este calor actualmente en la empresa Cajaplast se disipa al medio ambiente utilizando una torre de enfriamiento abierta en la cual se desecha el calor más una cantidad de agua en forma de vapor.



La importancia en la optimización, uso eficiente y racional de la energía está soportada en el continuo incremento de la demanda de energía asociada a los desarrollos tanto tecnológicos, sociales y económicos, debido a la necesidad de las industrias para ser más competitivos, aprovechando al máximo sus potenciales energéticos y a los esfuerzos para reducir los impactos ambientales de las tecnologías energéticas así como dar confort a los empleados y contar con servicios adecuados para la sanidad del personal.

### **3. OBJETIVOS**

Diseñar y construir un recuperador de calor compacto utilizando Tubos Termosifones Bifásicos que aproveche la energía residual del aire proveniente del compresor de alta presión de la empresa Cajaplast S.A. de C.V.

#### **4.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Optimizar la utilización del equipo para compresión de aire.
- Disminuir el consumo de gas butano, necesario para calentar agua de uso sanitario
- Mantener el confort de poco más de 450 empleados de la empresa
- Tener un impacto económico en el ahorro de hidrocarburos

### **4. HIPÓTESIS**

Utilizando tubos termosifones bifásicos se puede diseñar y fabricar un recuperador de calor capaz de extraer suficiente calor latente del aire comprimido que se genera como desecho en el proceso de la compresión de aire y este se utilice para elevar la temperatura del agua de una temperatura ambiente a un máximo de 32°C, de forma eficiente y económica.

## 5. ANTECEDENTES

Se han realizado diversos trabajos de análisis de fluidos en flujo bifásico en uno de ellos se desarrolla el modelado de dos fluidos en flujo bifásico en conductos cilíndricos verticales. (Azpiarte, 2003), como referencia específica a las relaciones existentes en régimen laminar y turbulento. En este trabajo se presenta el modelado matemático para dos fluidos y su aplicación en flujo bifásico, en régimen laminar y régimen turbulento. Con el fin de caracterizar las soluciones de desempeño térmico de conducción de energía y transferencia de calor para conductos cilíndricos verticales. Más tarde otro investigador propuso la utilización de TTB como una alternativa para la captación de calor residual y la aplicación de la energía recuperada en otro proceso. (Santiago, 2007), Esto es posible debido a la alta conducción y al intercambio de fase en los TTB y la excelente transferencia de calor durante el cambio de fase que ocurre en el interior de los TTB, con base en los resultados obtenidos se concluye que las pruebas son congruentes con las estimaciones teóricas, recuperando una carga térmica aproximada del 26% del calor residual y este se utilizó para aumentar la temperatura del agua (de temperatura ambiente a 56 °C). Posteriormente investigadores de la School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge, llevaron a cabo un estudio experimental con un TTB compacto cerrado fabricado con cobre y agua como fluido de trabajo (Jouhara y Robinson, 2009). Ellos se refieren al Tubo Termosifón Bifásico cerrado como un súper conductor térmico debido a que el proceso de cambio de fase mejora considerablemente el transporte de calor desde la zona de evaporación hasta la zona de condensación facilitando el intercambio térmico en la superficie del tubo de cobre y aprovechar este acoplamiento térmico para la captación de calor transportado durante el cambio de fase, determinando que la aplicación de un Tubo Termosifón Bifásico cerrado con agua como fluido de trabajo mejora la conducción térmica del cobre. Más tarde un grupo de investigadores realizaron un estudio teórico y experimental de operación de un TTB como se muestra en la figura 2 a diferentes condiciones de operación y se estudia su desempeño térmico a diferentes capacidades de llenado (Gómez y Díaz, 2011). Obteniendo gráficas representativas de los gradientes de temperatura y gráficas correspondientes a la vaporización del calor residual; como fluido de trabajo utilizaron agua, determinando que la energía calorífica conducida por un Tubo Termosifón Bifásico desde el punto de evaporización hasta el de condensación depende de la temperatura de salida de los gases residuales y de la cantidad de fluido de trabajo contenida en el tubo.

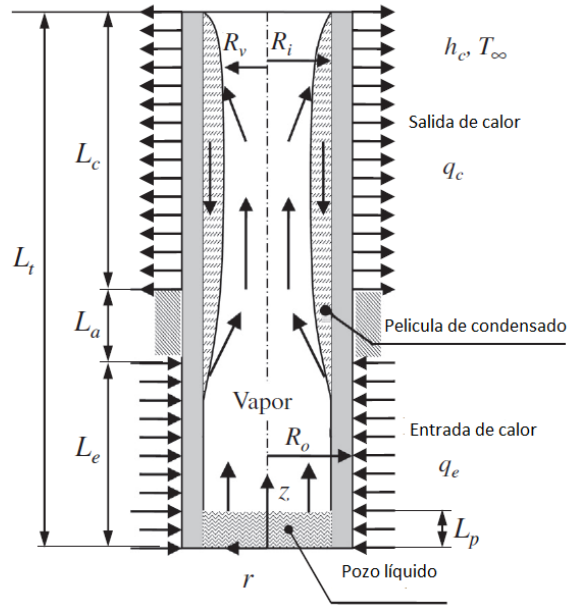


Figura 1 Descripción de un Tubo Termosifón bifásico (TTB)

Posteriormente un grupo de investigadores de la universidad de Connecticut realizaron la caracterización térmica de un TTB cerrado en diferentes condiciones de llenado, utilizando tubos de cobre y como fluido de trabajo agua (Shabgard et al, 2013). Ellos modelan matemáticamente cada una de las zonas de operación de los termosifones bajo diferentes condiciones de llenado para determinar el óptimo nivel de fluido de trabajo para maximizar la transferencia térmica en las paredes del tubo de cobre el cual acopla hidráulica y térmicamente las zonas de evaporación y condensación para mejorar la conducción energía térmica del cobre. Otro grupo de investigadores realizan una investigación numérica sobre el desempeño térmico de los tubos sifones a diferentes rangos de llenado y diferentes inclinaciones apoyándose de software de simulación para determinar la resistencia térmica, transferencia de calor en las paredes del tubo (Alammar et al, 2016). Encontraron como resultado que las condiciones de mayor rendimiento térmico se encuentran a un 65% de llenado en un ángulo de  $90^\circ$ . Un grupo de investigadores del Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP) realizan la caracterización de un intercambiador de calor con TTB mediante el software ASPEN comparando la eficiencia térmica de un intercambiador de tubos y coraza convencional con un intercambiador utilizando TTB. (Gómez et al. 2016), encontrando que en igualdad de condiciones iniciales un tubo termosifón bifásico transporta aproximadamente diez veces más calor que un tubo de cobre convencional. Más tarde otro grupo de investigadores realizan mejoras en el desempeño de un tubo termosifón bifásico agregando una delgada capa porosa de cobre en el interior del tubo utilizando agua como fluido de trabajo (Solomon et al. 2017). En este trabajo de investigación se concluye que la capa delgada porosa colocada por electro depósito hace la función de un tubo capilar mejorando la transferencia de calor en la zona de evaporación.

## 6. MARCO TEORICO

El Tubo Termosifón Bifásico es un dispositivo efectivo para transferencia de calor, este es comúnmente nombrado tubo de calor asistido por gravedad o tubo de calor sin malla, en los tubos termosifones bifásicos puede transferirse calor de un extremo a otro 500 veces más rápido que en un metal sólido.

El principio de operación de los Tubos Termosifones Bifásicos se muestra en la figura 2, (Gómez y Díaz, 2011), es un ciclo de evaporación y condensación de un fluido de trabajo, efectuado en su interior; así se aprovecha este cambio de fase como mecanismo de transferencia de calor. Este proceso lo hace prescindir de partes móviles, lo cual disminuye los costos de instalación, operación y mantenimiento. Si además de estas ventajas se toma en cuenta su alta eficiencia y bajo costo de fabricación, al tubo termosifón bifásico se le considera un dispositivo eficiente y rentable para la captación de energía térmica.

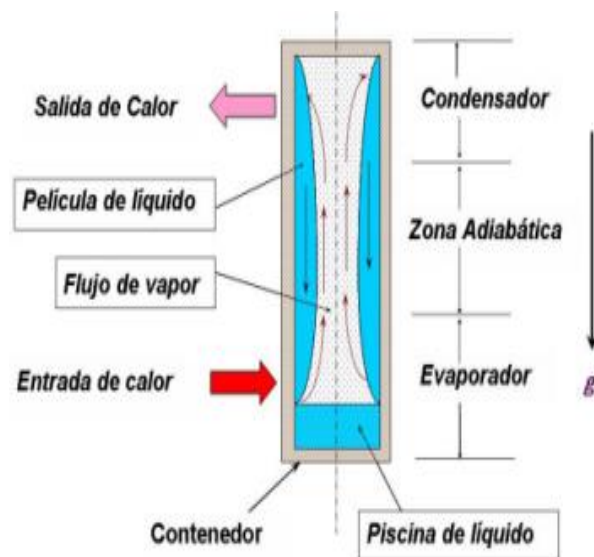


Figura 2 Tubo Termosifón Bifásico (TTB) Ciclo termodinámico

## A. Ciclo termodinámico

El termosifón bifásico trabaja en un ciclo termodinámico. La Figura 3 muestra el diagrama esquemático del ciclo que sigue el fluido de trabajo y los procesos involucrados dentro del tubo.

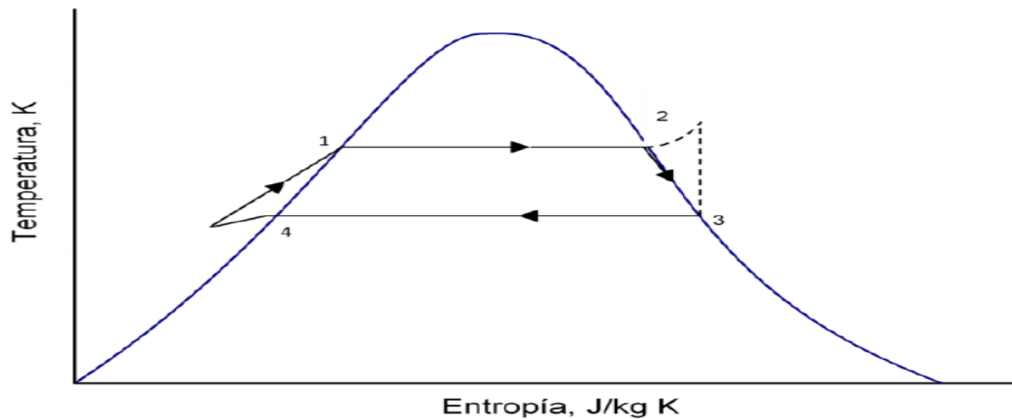


Figura 3 Ciclo termodinámico del termosifón bifásico en un diagrama T-S

La tabla No. 1 presenta una descripción de los procesos que ocurren en el interior de un Tubo Termosifón Bifásico TTB

Tabla 1 Descripción de fases del ciclo termodinámico de un Tubo Termosifón Bifásico (TTB)

Procesos	Descripción
1 a 2	El termosifón empieza a funcionar cuando se suministra calor $Q$ (gases residuales), sobre la pared exterior del evaporador a una temperatura promedio del evaporador $T_e$ . El calor es transferido por conducción a través de la pared hacia el fluido de trabajo, aumentando la temperatura y la presión del fluido de trabajo, entonces el fluido en el interior cambia de fase. Por lo que en este proceso se lleva a cabo la evaporación del fluido de trabajo.
2 a 3	Debido a la diferencia de presiones, el vapor que se genera fluye del evaporador hacia la sección del condensador, llevando la energía de evaporación pasando por la zona adiabática, hasta alcanzar la sección del condensador, la cual se ubica en una región de menor temperatura $T_c$ (aire ambiente)
3 a 4	Ahí el vapor que entra en contacto con la pared, se condensa y cede su calor latente al fluido frío del exterior.
4 a 1	Entonces y debido a que la posición del termosifón bifásico es vertical provoca que la acción de la gravedad sobre el fluido condensado escurra o se deslice por la pared en forma de película, hacia la sección del evaporador. Completándose de este modo en un ciclo de trabajo.

Para realizar un análisis termodinámico de un TTB, se toma como referencia la siguiente información técnica de un grupo de investigadores de Instituto Politécnico Nacional, en la cual utilizan un conjunto de ecuaciones necesarias para el análisis de un TTB. (Azpitarte, 2003)

Para obtener el flujo de calor crítico debido al límite de inundamiento, la siguiente ecuación es normalmente usada:

La ecuación uno se utiliza comúnmente para obtener el flujo de calor crítico debido al límite de inundamiento.

$$Q_{m\acute{a}x} = K \lambda A [g \sigma (p_1 - p_v)]^{-0.25} (p_v^{-0.25} + p_1^{-0.25})^{-2} \quad (1)$$

Donde

$$K = \left(\frac{p_1}{p_v}\right)^{0.14} \tanh^2 Bo^{0.25} \quad (2)$$

$$Bo = Di \left[ \frac{g(p_1 - p_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \quad (3)$$

Donde A es el área interna del tubo termosifón, Di es el diámetro interior del tubo, y Bo es el número de Bond.

Para el límite del recuperador, se utiliza la siguiente ecuación, para determinar la relación entre la carga del fluido de trabajo y el flujo de calor.

$$= \left[ \frac{g p_1^2 (D_c / D_e)}{3 \mu L_e^4 \sqrt{\sigma p v^2 (p_l - p_v)}} \right] * \left[ \frac{\left( \frac{Q_{m\acute{a}x}}{p_v h f g} \right) \left[ \frac{\sigma g (p_l - p_v)}{p_v^2} \right]^{-0.25}}{v_t} \frac{t / \pi D_c}{4 L_c / 5 + L_{ac} + (D_e - D_c)^{\frac{2}{3}} (L_{ac} + 3 L_e / 4)} \right]^3 * \left[ \frac{V_e / V_e (V_l / V_e) - p_v / p_l}{1 - p_v / p_1} \right]^3 \quad (4)$$

En una tubería cilíndrica se observó la formación de burbujas sobre la pared. Según un análisis estadístico de la permanencia de formación de burbujas se permitió establecer la siguiente relación para límite de ebullición.

El área interna de un tubo se puede calcular mediante la ecuación cinco

$$\left( \frac{Q_{max}}{A_v} \right) = K_3 L p_v \left[ \frac{\sigma g (p_1 - p_v)}{p_v^2} \right]^{0.25} \quad (5)$$

Donde

$A_c = (\pi D I_e)$  es el área interna del evaporador

$\sigma$ ; es la tensión superficial del líquido

$K_3$  es un parámetro de proporcionalidad donde Kutateladze y Borishanski demostraron experimentalmente está ecuación para  $K_3 \in [0.12-0.157]$

El menor de los anteriores límites de funcionamiento una temperatura dada definirá la máxima transferencia de calor para esa temperatura.

**Para determinar la cantidad de fluido de trabajo.**

La relación de llenado se define como el porcentaje del volumen ocupado por el fluido de trabajo entre el volumen del evaporador.

$$Vr = \frac{V_l}{V_e} \tag{6}$$

Cuando el elemento bifásico trabaja por debajo del máximo flujo de calor,  $Q_{\text{máx}}$ . El desempeño del tubo termosifón puede ser caracterizado por la resistencia térmica,  $R$ . El actual suministro de calor,  $Q$  y la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador ( $\Delta T = T_{p,e} - T_{p,c}$ ), estas se relacionan por medio de la ecuación:

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \tag{7}$$

La resistencia térmica total y específica de cada TTB se compone de la siguiente manera:

$R_{p,e}$   $R_{p,c}$  son las resistencias térmicas conductivas en las paredes del evaporador y del condensador.

$R_{int,e}$ ,  $R_{int,c}$ , son las resistencias térmicas convectivas en el interior del evaporador y condensador.

$R_{ext,c}$ , son las resistencias térmicas convectivas en el exterior del evaporador y condensador.

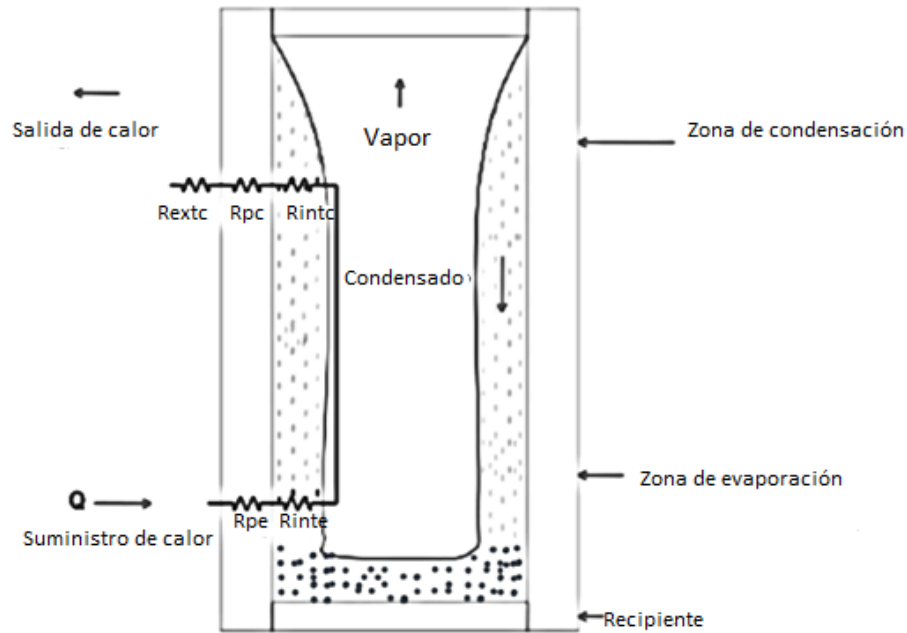


Figura 4 Esquema de las resistencias térmicas en un termosifón

Para determinar el coeficiente de convección en la parte externa de la superficie del condensador  $h_{e,c}$  se obtiene de la ecuación.

$$h = Nu \frac{k_a}{d_{ext}} \quad (8)$$

El número de Nusselt

$$\overline{Nu} = 0.26(Re)^{0.6}(Pr)^{0.37}(\varepsilon_T)^{0.25} \quad (9)$$

$$\varepsilon_T = \left[ \frac{Pr_f}{Pr_p} \right]^{0.25} \quad (10)$$

El número de Reynolds

$$Re_f = \frac{V d_{ext}}{\nu_a} \quad (11)$$

Ocurre un calentamiento del aire

Para calcular el coeficiente de eficiencia teórica  $E$  se necesita calcular el valor del parámetro de la aleta  $m$  para esto, a su vez se requiere conocer la conductividad térmica de la aleta correspondiente a su temperatura media  $T_A$ . También se deberá conocer la temperatura a la cual se determinarán las propiedades termo físicas del aire de enfriamiento y será la temperatura media.

$$\bar{T} = \frac{T_a + T_{p,a}}{2} \quad (12)$$



El coeficiente de convección de la pared hacia el fluido de trabajo en la sección del evaporador  $h_{i,e}$

Si se conoce el flux de calor por unidad de longitud  $\phi_e=Q/l_e$  en todo el largo del evaporador y si la temperatura de la superficie exterior del tubo se conoce en forma experimental, entonces se determina el coeficiente de convección en el interior de la sección del evaporador.

$$h_{i,e} = \frac{1}{\left(\frac{T_{p,e}-T_{v,e}}{\phi_e}\right)} \quad (13)$$

El coeficiente de convección de la pared hacia el fluido de trabajo en la sección del condensador  $h_{i,c}$

$$h_{i,c} = 0.943 \left[ \frac{g P i^2 (\lambda k_i^3)}{\mu l (T_{p,c}-T_{v,c}) l_c} \right] \quad (14)$$

## **B. Diseño CAD**

El diseño asistido por computadora es una herramienta indispensable para el desarrollo de equipos mecánicos, (SolidWorks, 2017), en nuestro caso el diseño de un recuperador de calor de tubos y coraza, para lo cual utilizaremos SolidWorks edición educativa 2016. Para realizar el CAD prototipo determinar el modelo adecuado, SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. El programa permite modelar piezas y conjuntos, extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD.

El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera sencilla. Este software es uno de los más utilizados en desarrollo de diseño CAD por sus aspectos de análisis y gestión de datos. [<https://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>]. Por sus características Solidworks, nos permite realizar dibujos mecánicos de Piezas, realizar Ensamblajes y Simulación/movimiento, Análisis de interferencia, 2D a 3D, Análisis de Elementos Finitos y validación de diseño. Los módulos que utilizaremos para análisis de diseño y simulación avanzada son: CosmosWorks®, CosmosXpress®, CosmosFloWorks® y CosmosMotion®.

## **C. COSMOSMotion®**

Aplicación que permite estudiar las condiciones de funcionamiento de un ensamblaje por la simulación del movimiento de sus partes integrantes. Combina el movimiento basado en las condiciones físicas con las restricciones geométricas y contiene una gran variedad de herramientas de visualización de resultados: aceleración, vector de fuerza, colisiones, etc. Es una herramienta adecuada para crear prototipos virtuales y validar el funcionamiento del mecanismo diseñado.

## **D. COSMOSXpress®**

Es una Herramienta simplificada de análisis basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM) que permite conocer el comportamiento mecánico (tensiones y deformaciones) sufridas por una pieza al ser cargada con fuerzas o presiones después de haber indicado las restricciones de movimiento en alguna de sus caras.

## E. COSMOSWorks®

Es la aplicación completa que permite estudiar el comportamiento mecánico de sus modelos 3D de forma más precisa y teniendo en cuenta otros aspectos que no son evaluados por COSMOSXpress®.

## F. COSMOSFlowWorks®

Herramienta de dinámica de fluidos que permite simular transferencia de calor, flujos compresibles, subsónicos y supersónicos, mezcla de gases, cavitación, entre otras. La aplicación está totalmente integrada en SolidWorks® ofreciendo un entorno de trabajo y unos cuadros de diálogo intuitivos y familiares. Funciona mediante un asistente que permite configurar el análisis y resolver el problema de forma rápida y sencilla.

## G. Ecuaciones de diseño para tubos termosifones bifásicos

Las siguientes son ecuaciones básicas para el diseño de un intercambiador de calor tubos y coraza (kern, 1999), se realizará de acuerdo a lo descrito por Donald, de la siguiente forma:

Obtener el flujo de calor transferido entre los fluidos (Q).

$$Q = (WCT_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1) \quad (15)$$

Calcular la  $\Delta T_{ml}$  considerando flujo a contracorriente.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{T_2 - t_1}} \quad (16)$$

Obtención del factor (Ft) de corrección debido al número de pasos, eliminando todos los arreglos de intercambio que tengan valor de Ft menor de 0.85.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (17)$$

Con los parámetros R y S se obtiene Ft de gráficas de Factores de Corrección  $\Delta T_{ml}$  para intercambiadores.

Calcular la diferencia de temperatura efectiva ( $\Delta T$ )

$$\Delta T = \Delta T_{ml} * Ft \quad (4)$$

Suponer un coeficiente global de transferencia de calor de diseño.

Calcular el área de transferencia de calor.

Fijar las características de los tubos: diámetro nominal (d), espesor de la pared (calibre BWG), longitud (L), y arreglo, así como el número de pasos para el lado tubos (nt), y el número de pasos para el lado de la coraza (ns).

Determinar el número de tubos (Nt).

$$Nt = \frac{A}{\pi \cdot d_o \cdot L} = \frac{A}{a_e \cdot L} \quad (18)$$

Y se redondea a un número entero

Se recalcula el área.

Determinar el diámetro interior de la coraza (DI) y el diámetro límite para los tubos.

Determinar el espaciamiento entre mamparas (B).

Los siguientes pasos se hacen para ambos lados.

Área de flujo

Lado coraza

$$a_s = \frac{DI \cdot C \cdot B}{a_s \frac{DI \cdot C \cdot B}{n_s p_T} n_s p_T} \quad (19)$$

Lado tubos

$$a_t = \frac{Nt \cdot \pi \cdot \frac{d_i^2}{4}}{2a} \quad (20)$$

Velocidad másica

Lado coraza

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad (21)$$

Lado tubos

$$G_t = \frac{W}{a_t} \quad (22)$$

Reynolds

Lado coraza

$$Re_s = \frac{De * G_s}{\mu_s} \quad (23)$$

Lado tubos

$$Re_s = \frac{De * G_t}{\mu_t} \quad (24)$$

Prandtl

Lado coraza

$$Pr = \frac{c * \mu_s}{k} \quad (25)$$

Lado tubos

$$Pr = \frac{c * \mu_t}{k} \quad (26)$$

Calcular la temperatura de la pared ( $t_w$ ).

$$t_w = t_c + \frac{\frac{h_{io}}{\phi_s}}{\frac{h_{io}}{\phi_s} + \frac{h_o}{\phi_s}} (T_c - t_c) \quad (27)$$

Calcular  $\phi_t$ ,  $\phi_s$  con las viscosidades evaluadas a la temperatura de la pared.

$$\phi_t = \left( \frac{\mu_{ft}}{\mu_w} \right) 0.14 \quad \phi_s = \left( \frac{\mu_{fs}}{\mu_w} \right) 0.14 \quad (28)$$

Calcular los coeficientes de película  $h_{io}$ ,  $h_o$ .

$$h_{io} = \frac{h_{io}}{\phi_t} * \phi_t \quad h_o = \frac{h_o}{\phi_s} * \phi_s \quad (29)$$

Calcular el coeficiente global de transferencia de calor limpio ( $U_c$ )

$$U_c = \frac{h_{io} * h_o}{h_{io} + h_o} \quad (30)$$

Calcular el coeficiente global de transferencia de calor de diseño ( $U_{Dcalc}$ ), considerando las resistencias debida a incrustaciones de material.

$$\frac{1}{u_{Dcalc}} = \frac{1}{U_c} + R_{di} + R_{do} = \frac{1}{U_c} + R_d \quad (31)$$

$$U_{Dcalc} = \frac{1}{\frac{1}{U_c} + R_d} \quad (32)$$

Si el coeficiente global de transferencia de calor de diseño calculado no es aproximadamente igual al coeficiente global de transferencia de calor de diseño supuesto, suponer otro valor de  $U_d$ , regresar al paso 8 y rehacer los cálculos. Adicionalmente, se pueden modificar uno o varios parámetros establecidos. Si  $U_d$  calculado y  $U_d$  supuesto son aproximadamente iguales, entonces continuar con el cálculo de las caídas de presión para el lado de los tubos y lado coraza.

Cálculo de la caída de presión.

Lado coraza: obtener el factor de fricción de tablas.

Lado tubos: obtener el factor de fricción de tablas.

Calcular el número de cruces en la coraza:

$$(N + 1) = \frac{L}{B} \quad (33)$$

Calcular la caída de presión de la sección recta

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L n_t}{2 g_{cp} D_i \phi_t} \quad (34)$$

Calcular la caída de presión total lado coraza

$$\Delta P_s = \frac{f G_t^2 D I (N+1)}{2 g_{cp} D_e \phi_s} \quad (35)$$

Calcular la caída de presión de la sección de retorno.

$$\Delta P_r = 4 p n_t \frac{v^2}{2g} \quad (36)$$

Calcular la caída de presión total del lado tubos

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_s \quad (37)$$

Para la simulación del recuperador de calor utilizaremos el software de diseño de procesos ASPEN TECH 2017 (Advanced System for Process Engineering), (aspen tech, 2017). Este software cuenta con un paquete dirigido al diseño y optimización de intercambiadores de calor y se basa en la ecuación de diseño.

$$Q = U * A * \Delta T_{ml} \quad (38)$$

## 7. METODOLOGÍA

Esta investigación tiene como enfoque el diseño y la construcción de un recuperador de calor de deshecho de un compresor recíprocante de la empresa CAJAPLAX S.A de C.V utilizando tecnología de tubos termosifones bifásicos con el objetivo de reutilizar este calor para el calentamiento de agua de uso sanitario y así contribuir al confort del personal y a la disminución del uso de hidrocarburos contaminantes a la atmósfera y ahorro energético.

La investigación a realizar es de tipo aplicada ya que se tiene como objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa de tecnología de transferencia de calor de cambio de fase aplicada para la recuperación de calor residual.

Los resultados de la investigación nos permitirán tener un ahorro económico, eficientar el trabajo del compresor, evitar el consumo de gas para el calentamiento de agua de uso sanitario, así como reducir las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente.

### Metodología de la investigación

Durante todo el procedimiento de investigación se analizarán artículos científicos, libros, tesis, revistas y cualquier tipo de información escrita que se considere importante y necesaria para la investigación; se realizarán investigaciones de campo para determinar las condiciones de trabajo.

Se realizarán un diseño CAD de la propuesta del recuperador de calor en solid Works evaluando con el software aspel después se compararán los resultados contra las condiciones de trabajo actuales si esto es satisfactorio se proseguirá con la construcción del recuperador de calor.

### Método e instrumentos de la investigación

Revisión bibliográfica para obtener fundamentos científicos y tecnológicos de nuestro objeto de estudios para lo cual utilizaremos cualquier tipo de artículo científico o respaldo tecnológico.

Se utilizarán instrumentos de medición para la investigación de campo como lo son medidores de temperatura (fluke 414 B) y manómetro de burdon.



Figura 5 Instrumentos de medición (Medidor de temperatura digital, medidor de temperatura de presión, manómetro de burdon, tablero de medición de compresor)



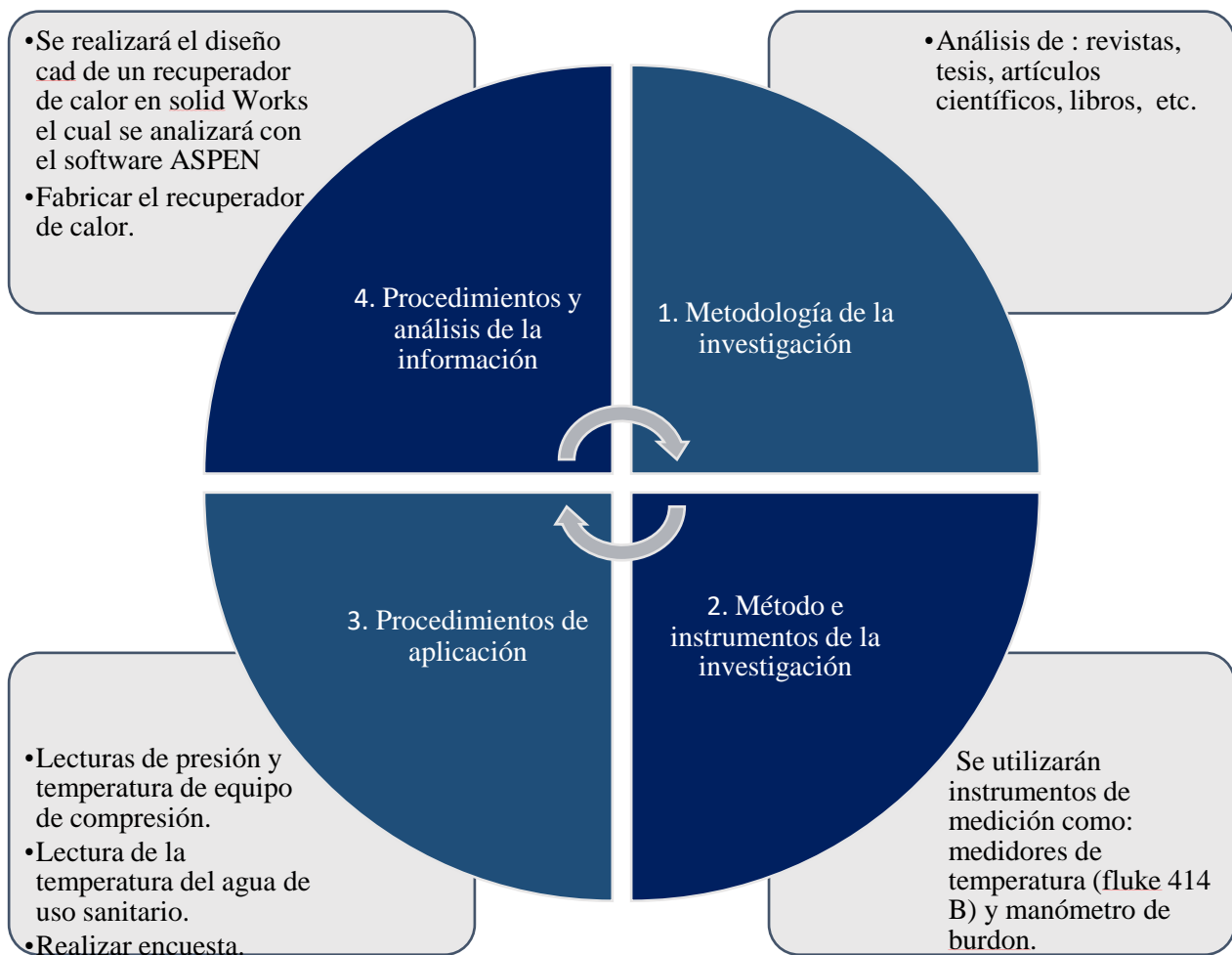
## 7.1 Procedimientos de aplicación

Se tomarán lecturas de temperatura y presión del equipo de compresión directo del panel de control, se tomarán tres lecturas por día en diferentes horarios mañana, tarde y noche durante los siete días en un año.

Se tomarán tres lecturas de temperatura del agua de uso sanitario tomando la muestra de referencia en el depósito de agua caliente durante la mañana, tarde y noche; el número de personas y horarios en los cuáles se utiliza el servicio para bañarse utilizando una encuesta.

## 7.2 Procesamiento y análisis de la información

Se realizará el diseño CAD de un recuperador de calor en solid Works el cual se analizará con el software ASPEN TECH 2017 comparando los resultados obtenidos de la simulación contra las condiciones actuales de trabajo que se obtuvieron con el análisis previo posteriormente se fabricará el modelo obtenido que satisfaga las condiciones de temperatura del agua de uso sanitario.



## A. Diseño de encuesta

### CAJAPLAX S.A. DE C.V.

El objetivo de la encuesta es conocer su opinión respecto a la calidad del agua disponible para tomar duchas dentro de la empresa.

#### Sección A: Tacha de acuerdo a su información.

<b>EDAD:</b> 20-30 años <input type="checkbox"/> 31-40 años <input type="checkbox"/> Más de 40 años <input type="checkbox"/>	<b>SEXO:</b> F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/>
---	---

#### Sección B: Subraye la respuesta que sea para usted la adecuada.

**1.- ¿Ha tomado una ducha dentro de la empresa?**

- a) Si
- b) No

**2.- ¿Cuál es la frecuencia con la que toma una ducha dentro de la empresa?**

- a) 6 – 4 días
- b) 3 – 1 días
- c) Nunca

**3.- ¿De cuánto tiempo es la ducha que toma?**

- a) De 5 a 10 minutos
- b) De 11 a 20 minutos
- c) Más de 20 minutos

**4.- ¿Cómo considera la temperatura del agua?**

- a) Buena
- b) Mala
- c) Regular

**5.- De los siguientes problemas señale ¿Cuál es el que presenta el agua al momento de tomar una ducha?**

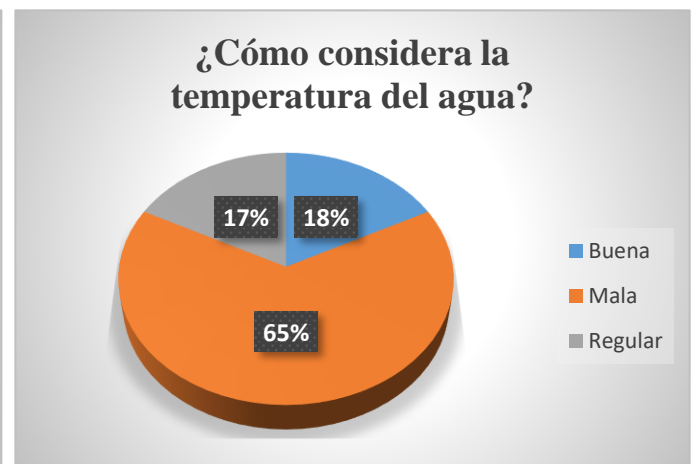
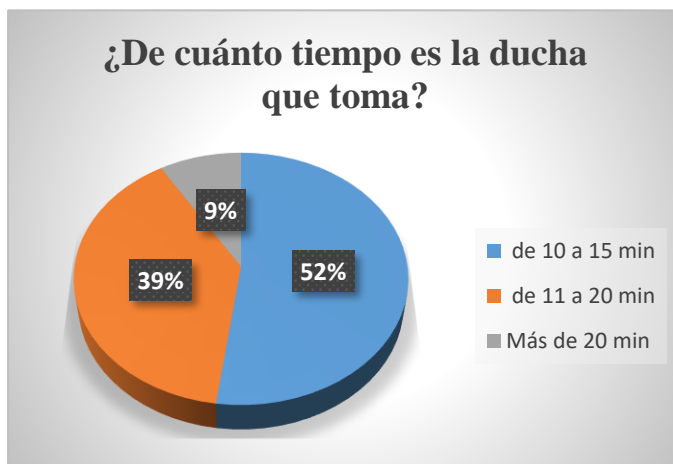
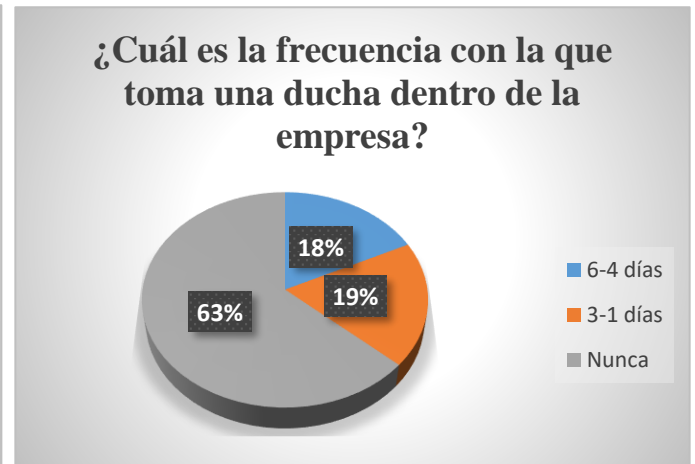
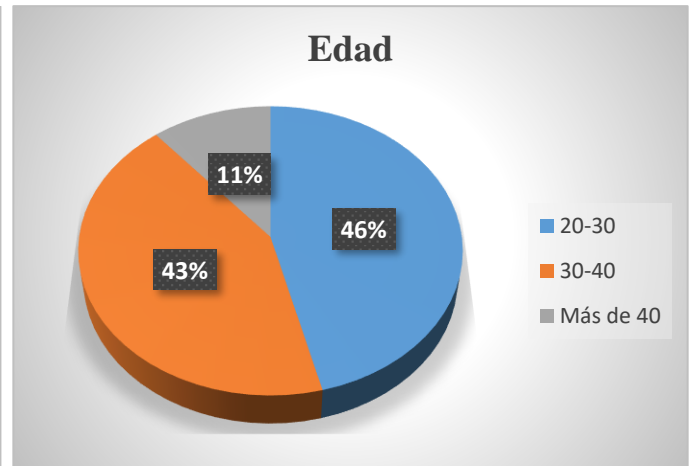
- a) Demasiado fría
- b) Demasiado caliente
- c) Temperatura adecuada

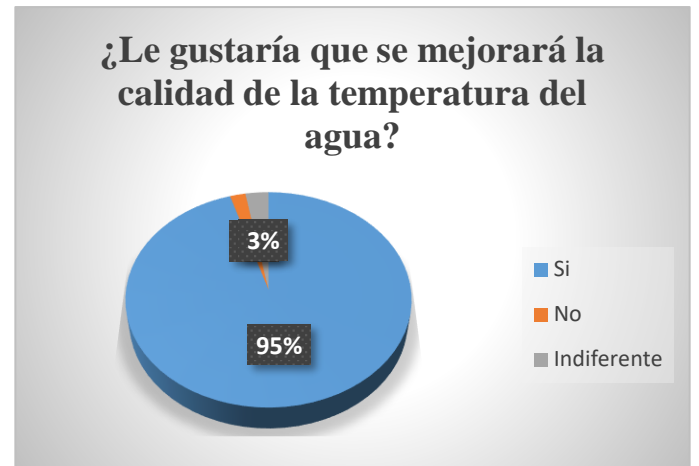
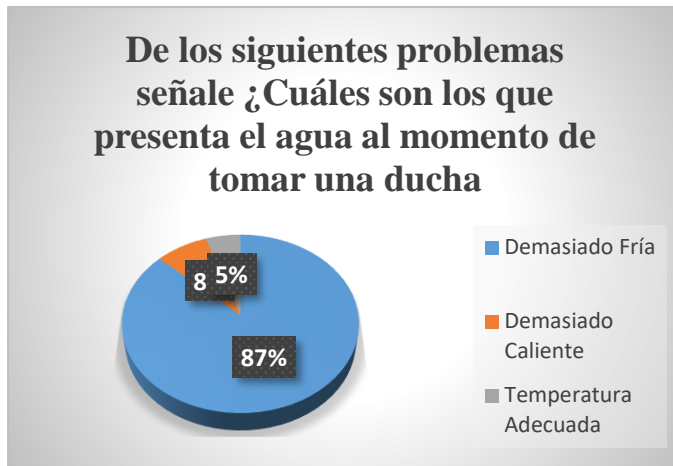
**6.- ¿Le gustaría que se mejorará la calidad de la temperatura del agua?**

- a) Si
- b) No
- c) Indiferente

Muchas gracias por su colaboración.

## B. Resultados de la encuesta





Objetivo: conocer la opinión de los usuarios respecto a la calidad del agua disponible para tomar duchas dentro de la empresa.

No.	Pregunta	F	M
a	Sexo de los encuestados	189	126

No.	Pregunta	20-30	30-40	Más de 40
b	Edad	145	135	35

No.	Pregunta	Si	No
1	¿Ha tomado una ducha dentro de la empresa?	115	200

No.	Pregunta	6-4 días	3-1 días	Nunca
2	¿Cuál es la frecuencia con la que toma una ducha dentro de la empresa?	56	59	200

No.	Pregunta	de 10 a 15 min	de 11 a 20 min	Más de 20 min
3	¿De cuánto tiempo es la ducha que toma?	60	45	10

No.	Pregunta	Buena	Mala	Regular
4	¿Cómo considera la temperatura del agua?	20	75	20

No.	Pregunta	Demasiado Fría	Demasiado Caliente	Temperatura Adecuada
5	De los siguientes problemas señale ¿Cuáles son los que presenta el agua al momento de tomar una ducha	100	9	6

No.	Pregunta	Si	No	Indiferente
6	¿Le gustaría que se mejorará la calidad de la temperatura del agua?	300	6	9

Tabla 2 Resultados de encuesta

### C. Conclusiones de la encuesta

Se encuestaron un total de 317 personas

- 1.- El 37% del personal ha tomado una ducha dentro de la empresa.
- 2.- El 18% utiliza con frecuencia el servicio de la ducha.

Las personas que han utilizado la ducha opinan lo siguiente:

- 1.- El 52% toma una ducha de 10 a 15 minutos.
- 2.- El 65% considera que la temperatura del agua es inadecuada.
- 3.- El 87% del personal opina que el agua de la ducha es demasiado fría.
- 4.- El 95% opina que le gustaría que mejorara el servicio de la ducha.

### D. Resultados de presión y temperatura del compresor

#### Temperatura en °F

Mínimo	229
Máximo	348
Promedio	314.60

Tabla 3 Temperatura °F



#### Presión en bar

Mínimo	26
Máximo	30
Promedio	29.19

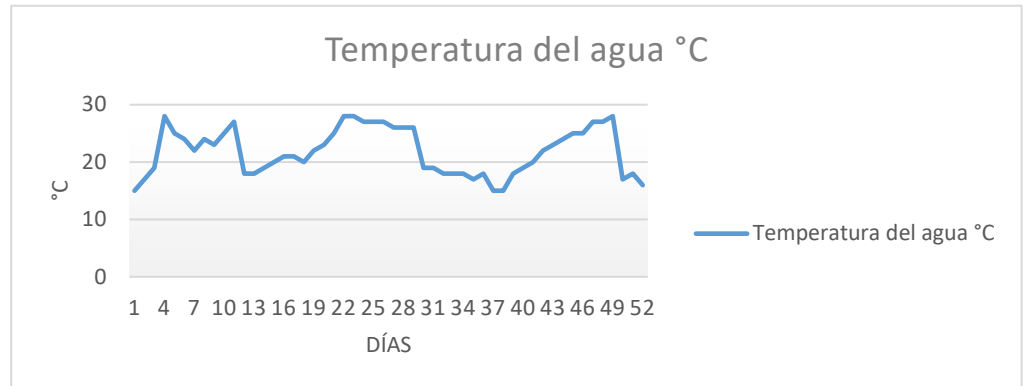
Tabla 4 Presión en bar



## E. Resultados de la temperatura del agua

Temperatura en °C	
Mínimo	15
Máximo	28
Promedio	21.87

Tabla 5 Temperatura en °C



## F. Balance de energía

### Datos de fluido frío (agua)

Se desea recuperar 45°C

Agua potable

Flujo masico  $\dot{m}_{Ff} = 50 \text{ LPM} = 0.85 \text{ kg/s}$

Presión= 25 lb

Diámetro de la tubería= 1"

Calor latente a presión constante  $C_{pFf} = 4.178 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$

Coefficiente de convección  $h_{\text{agua}} = 4000 \text{ w/m}^2\text{K}$

Coefficiente de conducción  $k_{\text{agua}} = 0.6 \text{ w/m}^2\text{K}$

Temperatura de entrada de fluido frio  $T_{f,i} = 20^\circ\text{C}$

Temperatura de salida de fluido frio  $T_{f,o} = 45^\circ\text{C}$

### Datos de fluido caliente (aire comprimido)

P: Presión 35 bar

Temperatura de entrada del aire  $T_{c,i} = 140^\circ\text{C}$

Calor latente a presión constante  $C_{pFc} = 1.013 \text{ KJ/kg}^\circ\text{K}$

Flujo másico  $m_{Fc} = 1600 \text{ CFM (Kg/hr)} = 3,266 \text{ Kg/hr}$

Diámetro de la tubería 3 plg

Calculo termodinámico del recuperador de calor.

Balance de energía

$$Q = \dot{m}_{fc} C_{p,fc} (T_{c,i} - T_{c,o}) = \dot{m}_{Ff} C_{p,Ff} (T_{f,i} - T_{f,o}) = UA_S LMTD \quad (39)$$

Se desea recuperar calor latente en la zona de evaporización para elevar la temperatura del fluido frío de 20 °C a 45 °C. Se determina la razón de transferencia de calor.

$$Q = \dot{m}_{Ff} C_{p,Ff} (T_{f,i} - T_{f,o}) \quad (40)$$

$$Q = 0.85 \text{ Kg/s} * 4.178 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K} * (45^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})^\circ\text{K} = 88.78 \text{ KJ/s}$$

Cantidad de calor que se desea recuperar.

$$Q = 88.78 \text{ KW}$$

Se determina la temperatura de salida del aire lado evaporador

$$Q = \dot{m}_{fc} C_{p,fc} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (41)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{\dot{m}_{fc} C_{p,fc}} \quad (42)$$

$$\Delta T = \frac{319608 \text{ KJ/hr}}{3266 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} * 1.013 \text{ KJ/kg}^\circ\text{K}} = 96.6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_{c,i} - T_{c,o} \quad (43)$$

$$T_{c,o} = 140^\circ\text{C} - 96.6^\circ\text{C} = 43.4^\circ\text{C}$$

Se determina la diferencia de temperatura LMTD

$$LMTD = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (44)$$

$$\Delta T_1 = 96.6^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 76.6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 140^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C} = 95^\circ\text{C}$$

$$LMTD = \frac{95^\circ\text{C} - 76.6^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{95^\circ\text{C}}{76.6^\circ\text{C}}\right)} = 85.47^\circ\text{C}$$

Se determina el coeficiente global de transferencia de calor unitario

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{agua}} + R_{kagua} + R_{hagua} \quad (45)$$

$$R_{kagua} = \frac{L}{k} = \frac{0.001}{0.6} = 1.6 * 10^{-3} \text{ w/m}^2\text{K}$$

$$R_{hagua} = \frac{L}{k} = \frac{0.001}{4000} = 2.5 * 10^{-7} \text{ w/m}^2\text{K}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{4000 \text{ w/m}^2\text{K}} + 1.6 * 10^{-3} \text{ w/m}^2\text{K} + 2.5 * 10^{-7} \text{ w/m}^2\text{K} = 1.85 * 10^{-3} \text{ w/m}^2\text{K}$$

$$U = 540.46 \text{ w/m}^2\text{K}$$

Se determina el área superficial requerida por el recuperador de calor

$$Q = UA_S LMTD \tag{46}$$

$$A_S = \frac{Q}{U * LMTD} \tag{47}$$

$$A_S = \frac{88780w}{540 \text{ w/m}^2\text{K} * 358.62^\circ\text{K}} = 0.45\text{m}^2$$

Se determina la longitud equivalente

$$L = \frac{A_S}{\pi D} = \frac{0.45\text{m}^2}{\pi(0.019)\text{m}} = 7.53\text{m} \approx 8 \text{ m} \tag{48}$$

Se determina el número de tubos de 30cm requeridos  $\frac{8 \text{ m}}{0.30 \text{ cm}} = 26.67 \text{ tubos} \approx 27 \text{ tubos}$

Se determina un arreglo triangular de 30°C con un pitch=37.75 mm

Con base a la norma TEMA se determina un intercambiador clase C en configuración BEM y en contra flujo para el diseño del recuperador de calor.

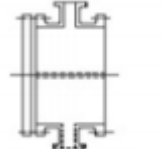


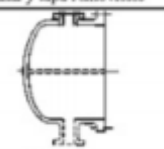
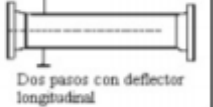
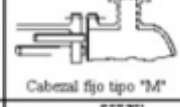
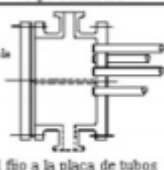

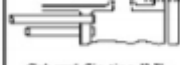
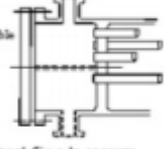

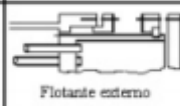
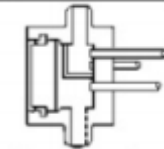


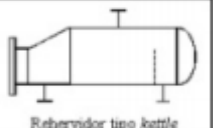

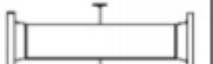


CABEZALES ANTERIORES: ESTACIONARIOS O FLUJOS		TIPOS DE CARCAZAS	CABEZALES POSTERIORES
<b>A</b>	 Canal y tapa removibles	<b>E</b>  Un solo paso	<b>L</b>  Cabecal fijo tipo "L"
<b>B</b>	 Tipo sombrero	<b>F</b>  Dos pasos con deflector longitudinal	<b>M</b>  Cabecal fijo tipo "M"
<b>C</b>	 Tapa removible Canal fijo a la placa de tubos	<b>G</b>  Flujo distribuido	<b>N</b>  Cabecal fijo tipo "N"
<b>N</b>	 Tapa removible Canal fijo a la carcasa	<b>H</b>  Doble flujo distribuido	<b>P</b>  Flotante externo
<b>D</b>	 Especial para altas presiones	<b>J</b>  Flujo dividido	<b>S</b>  Anillos divididos
		<b>K</b>  Rehervidor tipo kettle	<b>T</b>  Tracción continua
		<b>X</b>  Flujo cruzado	<b>U</b>  Tubos en "U"
			<b>W</b>  Flotante sellado externamente

Figura 6 Designación de las secciones de intercambiadores tubo-carcasa, TEMA.



### Diseño mecánico del recuperador de calor

Para determinar el espesor requerido de los tubos TTB se utiliza cobre.

Espesor de la pared del tubo

$$t = \frac{P}{S} * ri \tag{49}$$

$$t = \frac{3500Pa}{26500KPa} * 7.39mm = 0.0976mm$$

Se selecciona tubo de cobre de 3/4" calibre BWG 14, con espesor de 2.11 mm

Los TTB se diseñan de acuerdo a lo descrito por el artículo “Estudio analítico-experimental de operación de un tubo termosifón bifásico” donde se toma un 17% de llenado con agua bidestilada como fluido de trabajo.

Para la carcasa se determina el espesor de acuerdo a la norma ASME sección VIII

$$t = \frac{PR}{St-0.6P} \tag{50}$$

$$t = \frac{(508 \text{ psi})(5")}{(13800 \text{ psi} * 0.85) - 0.6(508 \text{ psi})} = \frac{2540}{11730 - 304.8} = \frac{2540}{11425.2} = 0.223 \approx 1/4" \text{ de espesor}$$

Se selecciona un material ASTM/ASME SA-285-C espesor de 5/16"

Especificación	Descripción y uso final	
ASTM/ASME SA 285 C	Recipientes estacionarios de resistencia baja e intermedia.	
ASTM/ASME SA 455	Recipientes estacionarios de alta resistencia.	
ASTM/ASME SA 516 60 y 70	Recipientes de media resistencia para servicio de media y baja temperatura.	
NMX B-475	Recipientes a presión (esferas).	
ASTM/ASME SA 612	Recipientes para caros tanque de Ferrocarril.	
AAR TC-128-B		

Composición química y propiedades mecánicas										
Especificación	Composición química % en peso (máximo)						Limite elástico min. KSI	Ultima tensión min. KSI	% de elong. min. en 8"	Rango de dimensión
	C	Mn	P	S	Si	Cb				
ASTM/ASME SA 285 C	0.28	0.90	0.035	0.035	-	-	30	55-75	23	1
ASTM/ASME SA 455										
Espesor ≤ 0.375"	0.33	0.85-1.20	0.035	0.035	0.10	-	38	75-95	15	2
Espesor > 0.375" - ≤ 0.580"	0.33	0.85-1.20	0.035	0.035	0.10	-	37	73-93	15	2
Espesor > 0.580" - ≤ 0.750"	0.33	0.85-1.20	0.035	0.035	0.10	-	35	70-90	15	2
ASTM/ASME SA 516 60										
Espesor ≤ 0.500"	0.21	0.60-0.90	0.035	0.035	0.15-0.40	-	32	60-80	21	2
Espesor > 0.500" hasta Z'	0.23	0.85-1.20	0.035	0.035	0.15-0.40	-	32	60-80	21	2
ASTM/ASME SA 516 70										
Espesor ≤ 0.500"	0.27	0.85-1.20	0.035	0.035	0.15-0.40	-	38	70-90	17	2
Espesor > 0.500" hasta Z'	0.28	0.85-1.20	0.035	0.035	0.15-0.40	-	38	70-90	17	2
NMX B-475 (1)										
Espesor > 0.1875" - ≤ 1.375"	0.22	1.0-1.60	0.035	0.030	0.50	0.020-0.05	55	77-91	17	3
Espesor > 1.375" - ≤ 2.0"	0.22	1.0-1.60	0.035	0.030	0.50	0.020-0.05	53	73-87	17	3
ASTM/ASME SA 612										
Espesor ≤ 0.500"	0.25	1.0-1.50	0.035	0.025	0.15-0.50	-	50	83-105	16	2
Espesor > 0.500" - ≤ 1.0"	0.25	1.0-1.50	0.035	0.025	0.15-0.50	-	50	81-101	16	2
AAR TC-128-B	0.24	1.0-1.65	0.025	0.015	0.15-0.40	0.050	50	81-101	16	2

Figura 7 Aceros para recipientes a presión

Para determinar las tapas se selecciona tapas semicilíndricas del mismo espesor de la coraza y se selecciona una configuración de baffles de segmentado simple.

Se calcula el espesor de las tapas de acuerdo a la norma ASME sección VIII

E=eficiencia de la soldadura

$$t = \frac{PR}{2SE-0.2P} \quad (51)$$

$$t = \frac{(508 \text{ psi})(5")}{(243800 \text{ psi} * 0.85) - 0.2(508 \text{ psi})}$$

$$t = 0.108" \approx 1/8"$$

Se colocaron dos deflectores en cada zona de los TTB espaciados 4" entre cada uno.

Se determina el flujo masico al que será sometido el recuperador de calor del lado critico (zona de evaporización).

Flujo másico por unidad de área.

$$G_{max} = \rho U_{max} = \frac{\dot{m}}{A_{min}} \quad (52)$$

$$G_{max} = \frac{3,266 \text{ Kg/hr}}{0.1069 \text{ m}^2} = 321,172 \text{ Kg/hr} * \text{m}^2$$

$$G_{max} = 89.21 \text{ Kg/s} * \text{m}^2$$

Viscocidad del aire a 140 °C

$$\nu = 2.745 \times 10^{-5} \text{ Kg/m} * \text{s}$$

$$Re_D = \frac{G_{max} * D}{\nu} \quad (53)$$

$$Re_D = \frac{89.21 * 0.127}{2.745 * 10^{-5}}$$

$$Re_D = 41,273.843$$

El flujo está en régimen transitorio  $10^5 < Re_p < 4 * 10^4$

## H. Diseño CAD de tubos termosifones



*Figura 8 Tubo termosifón*

Plano 1

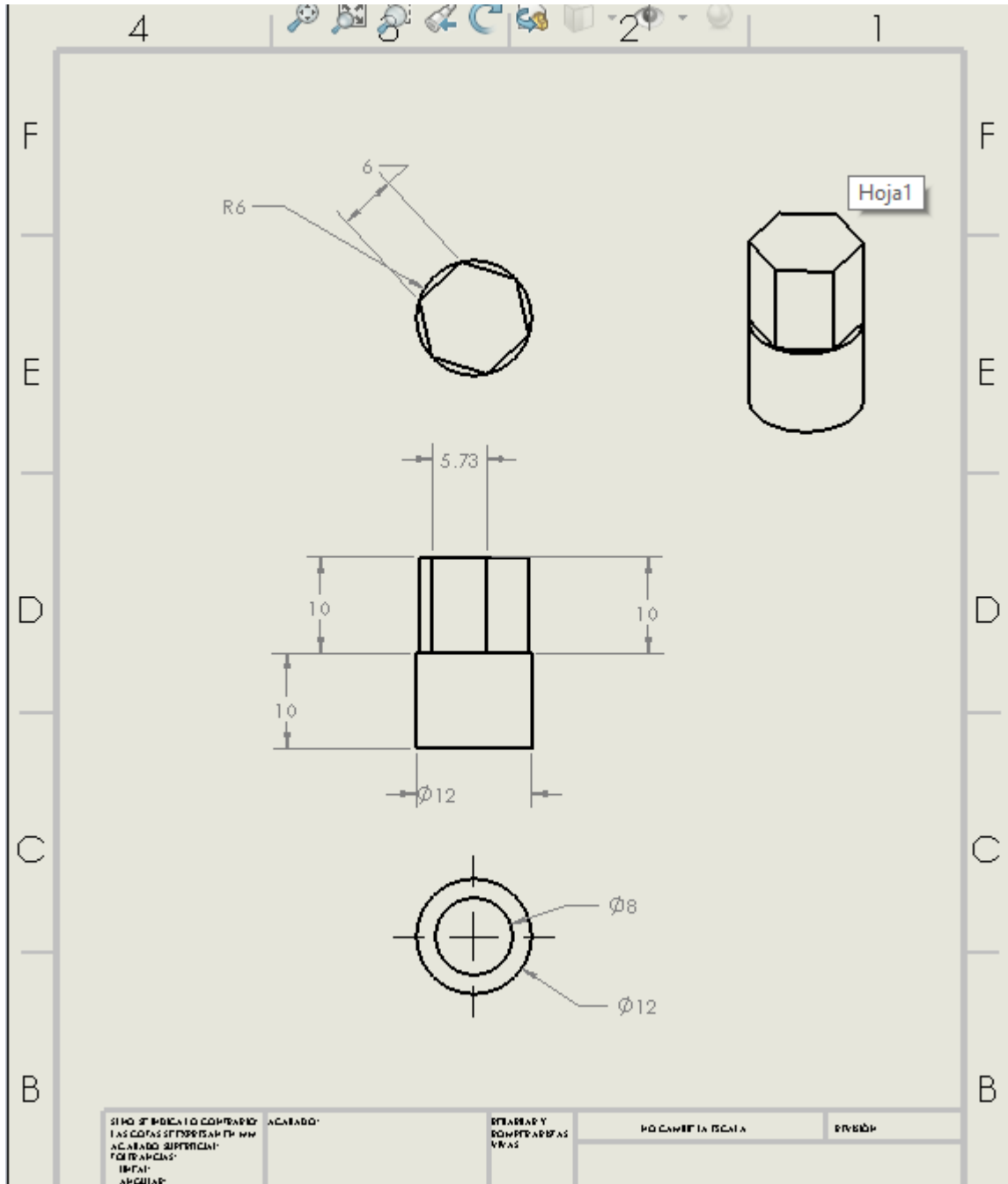


Figura 9 Válvula

Plano 2

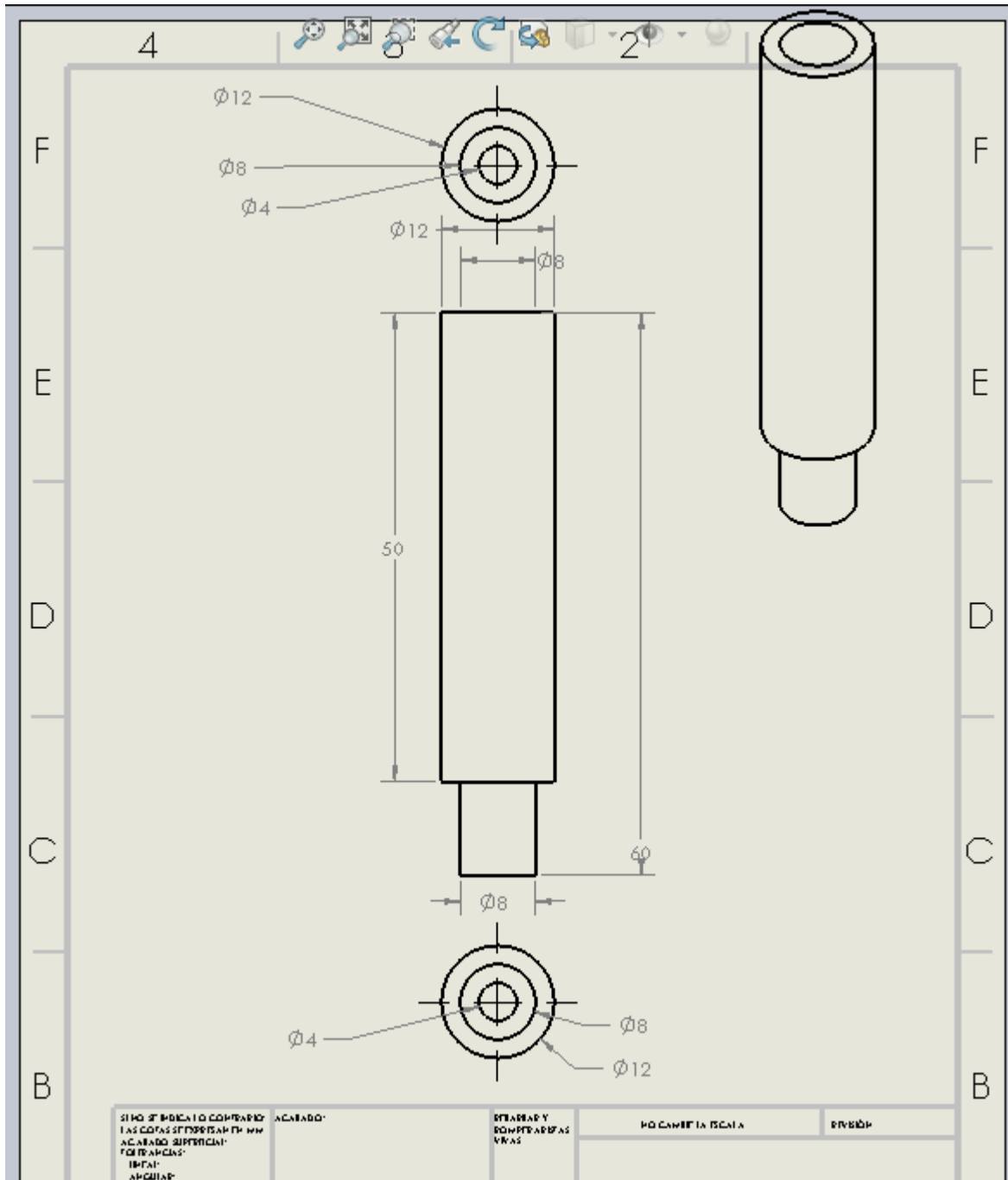


Figura 10 Tapón

Plano 3

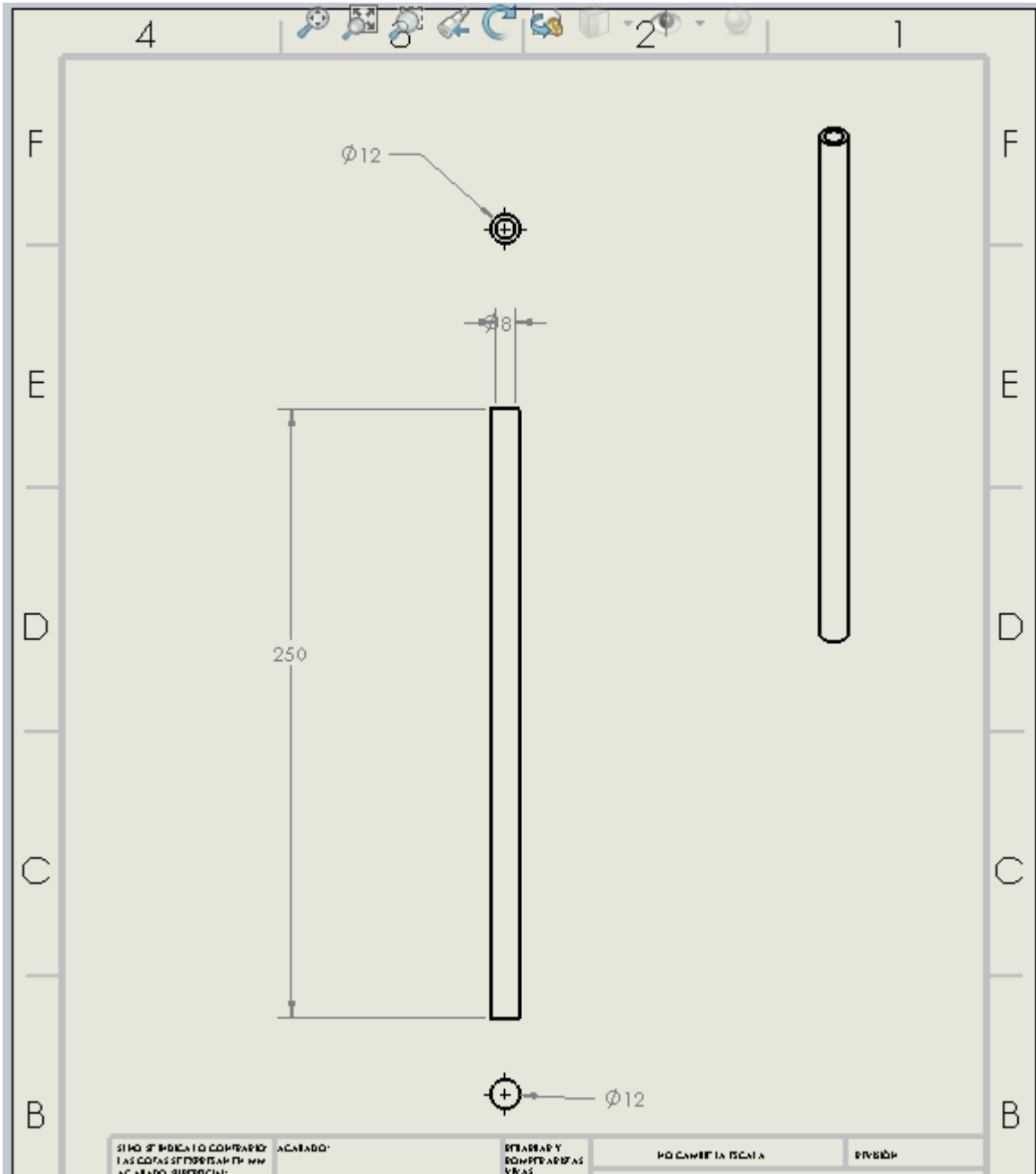
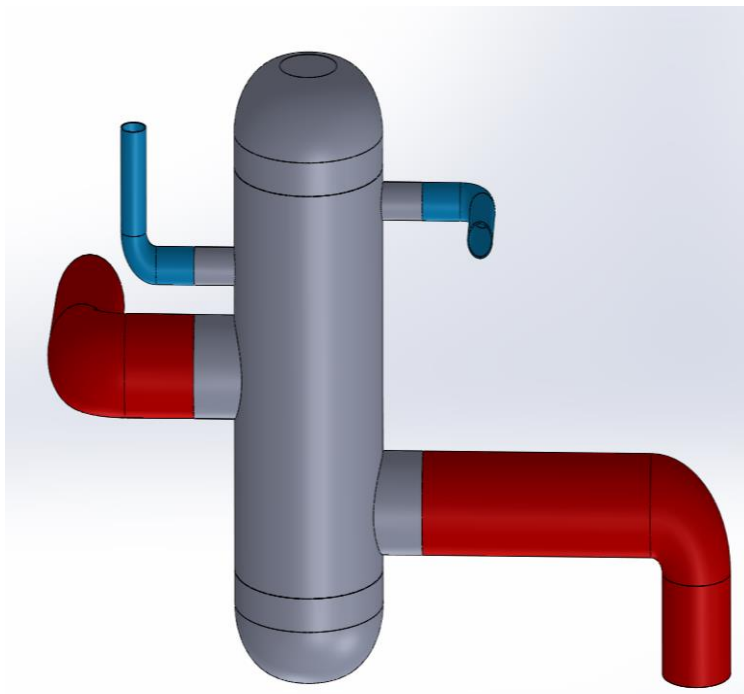


Figura 11 Tubo

## I. Diseño CAD de la coraza



*Figura 12 Coraza*

Plano 4

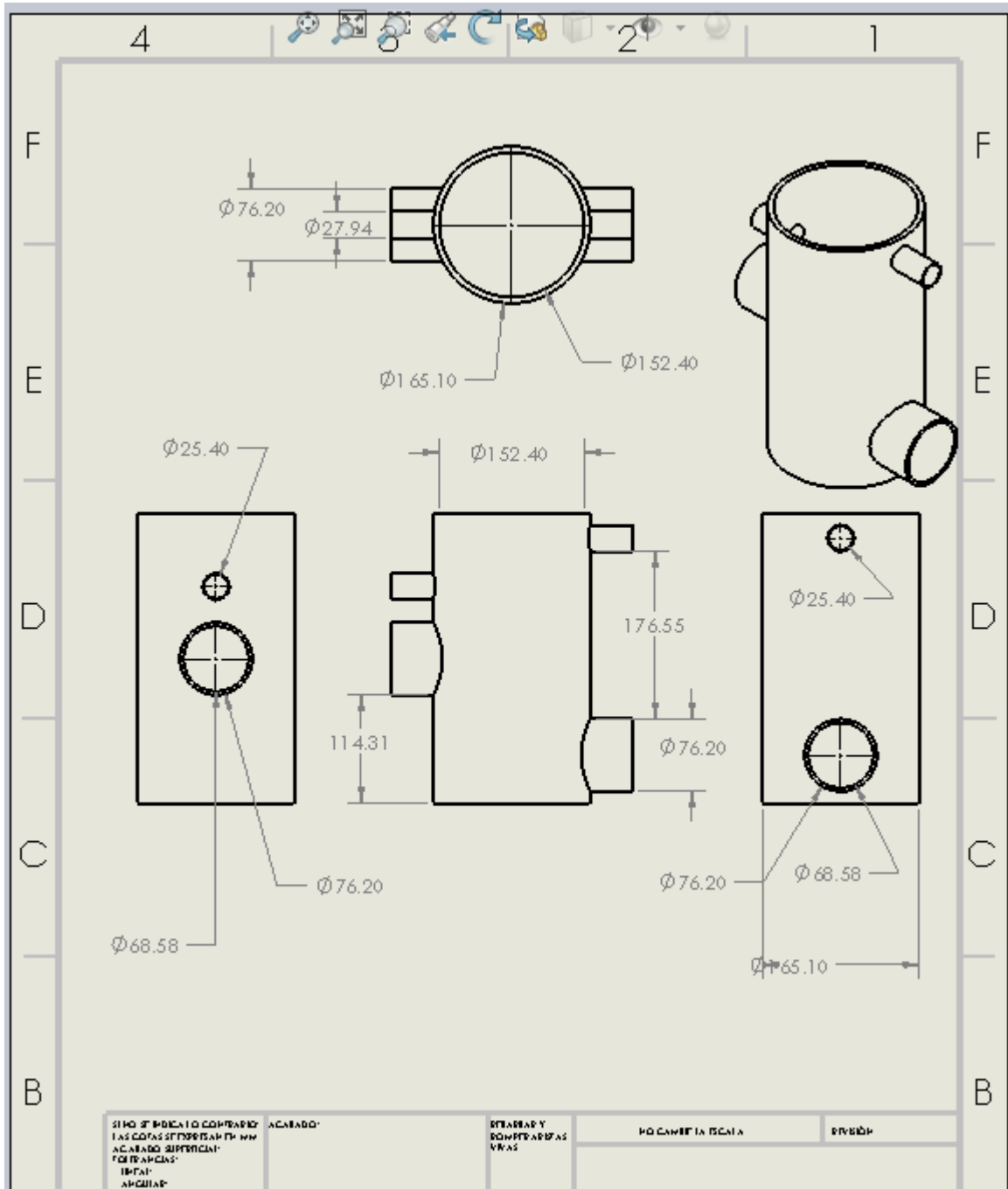


Figura 13 Cabezal



Plano 5

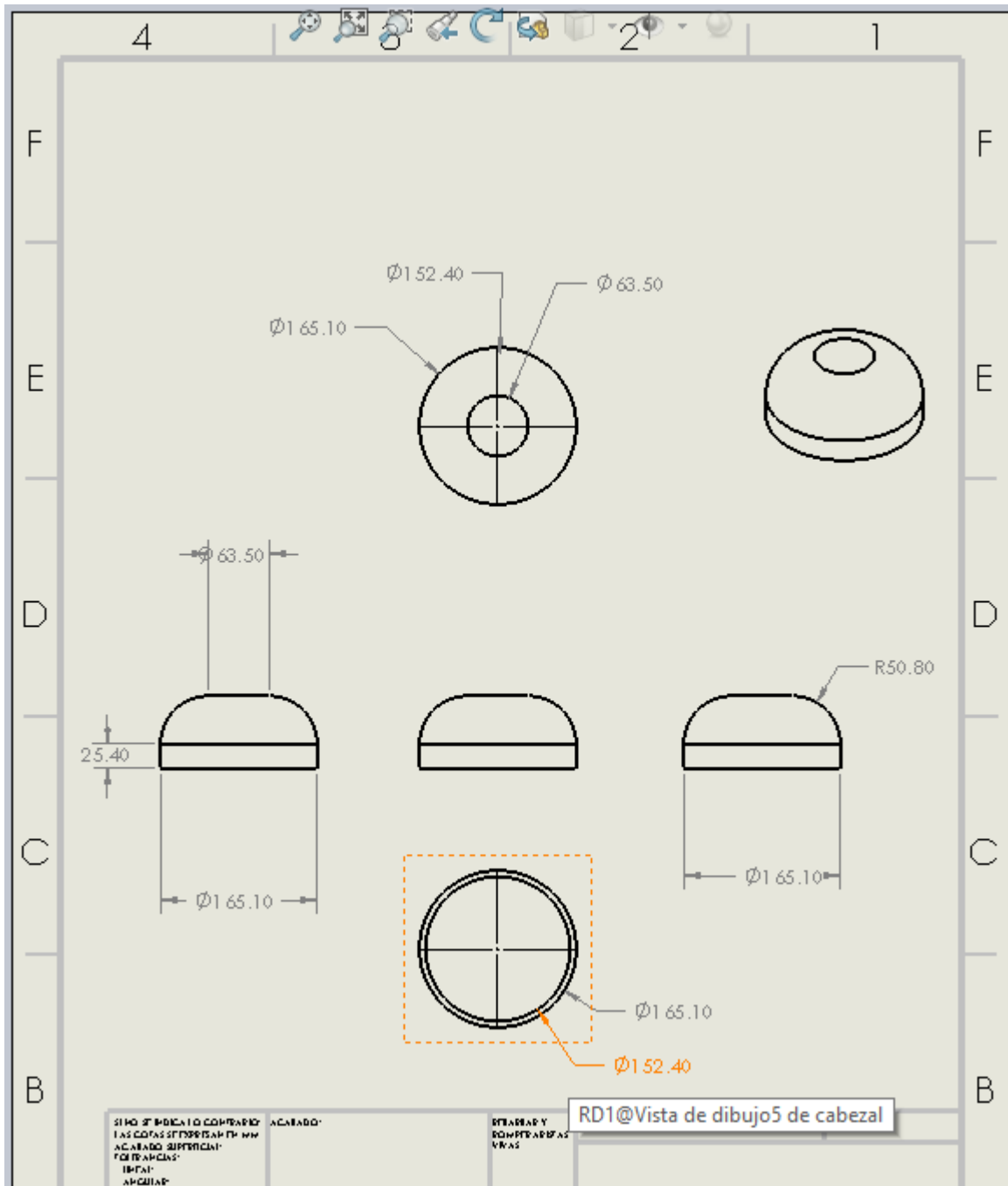


Figura 14 Cabezal

Plano 6

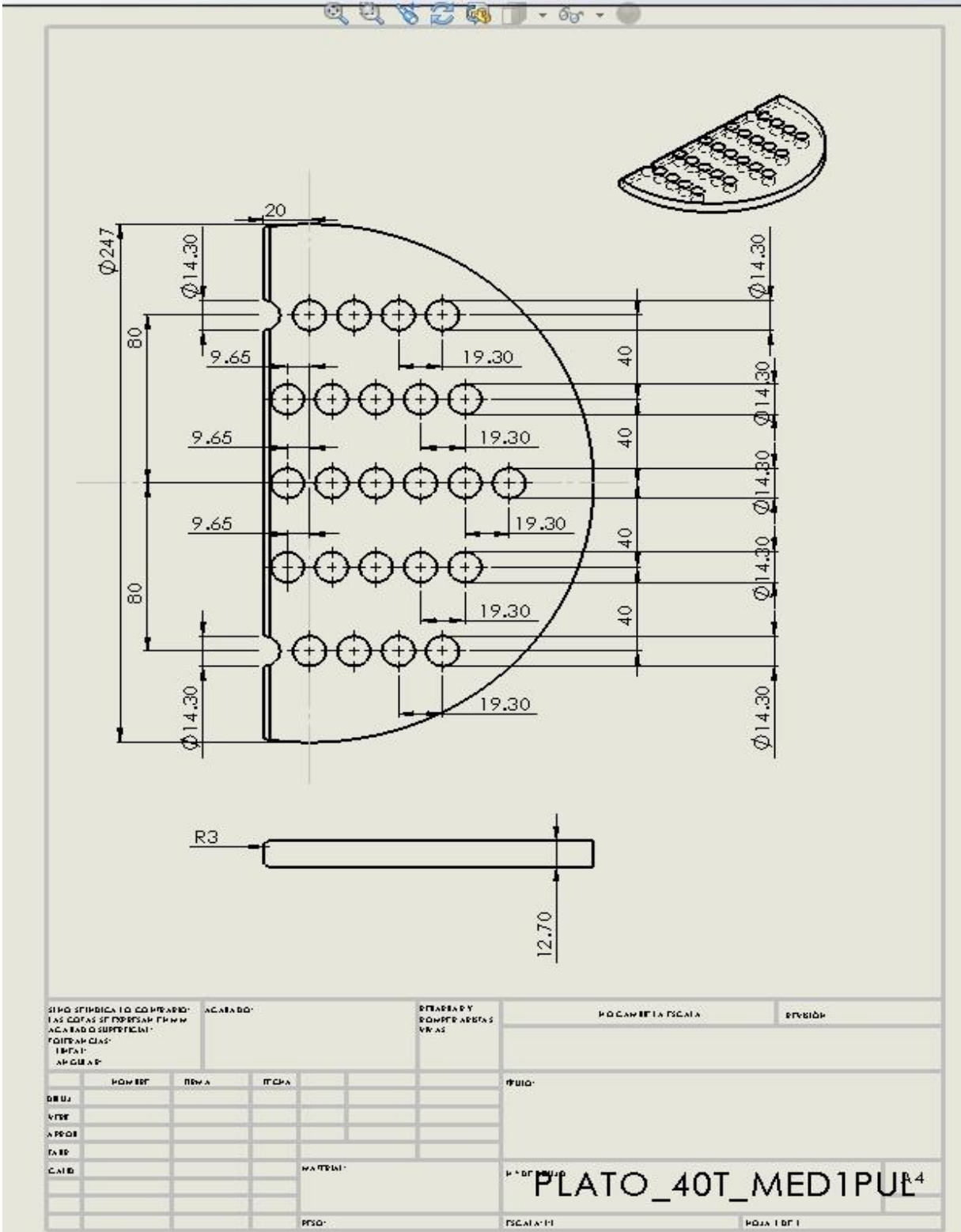


Figura 15 Deflectores



Plano 8

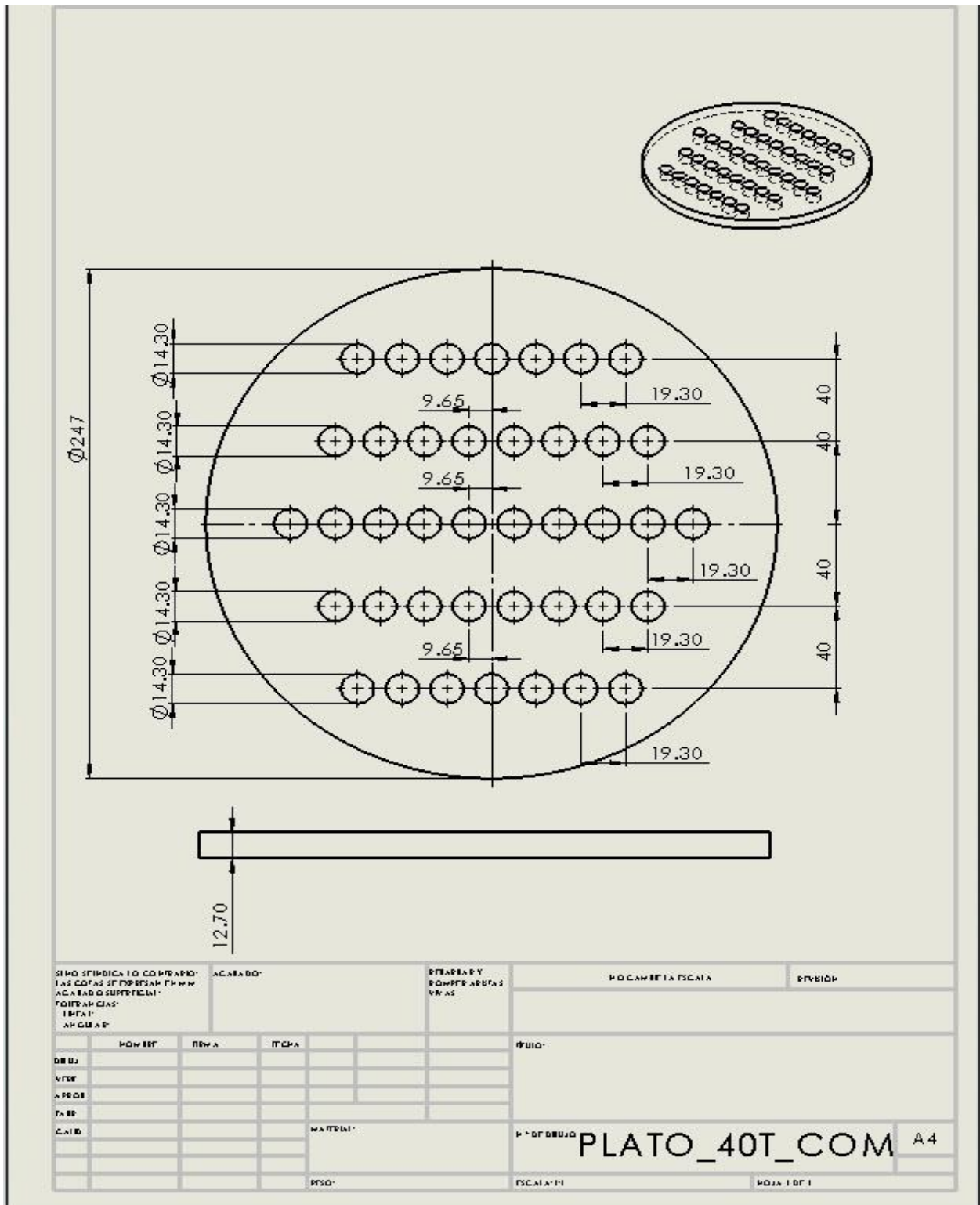


Figura 17 Espejo

Plano 9

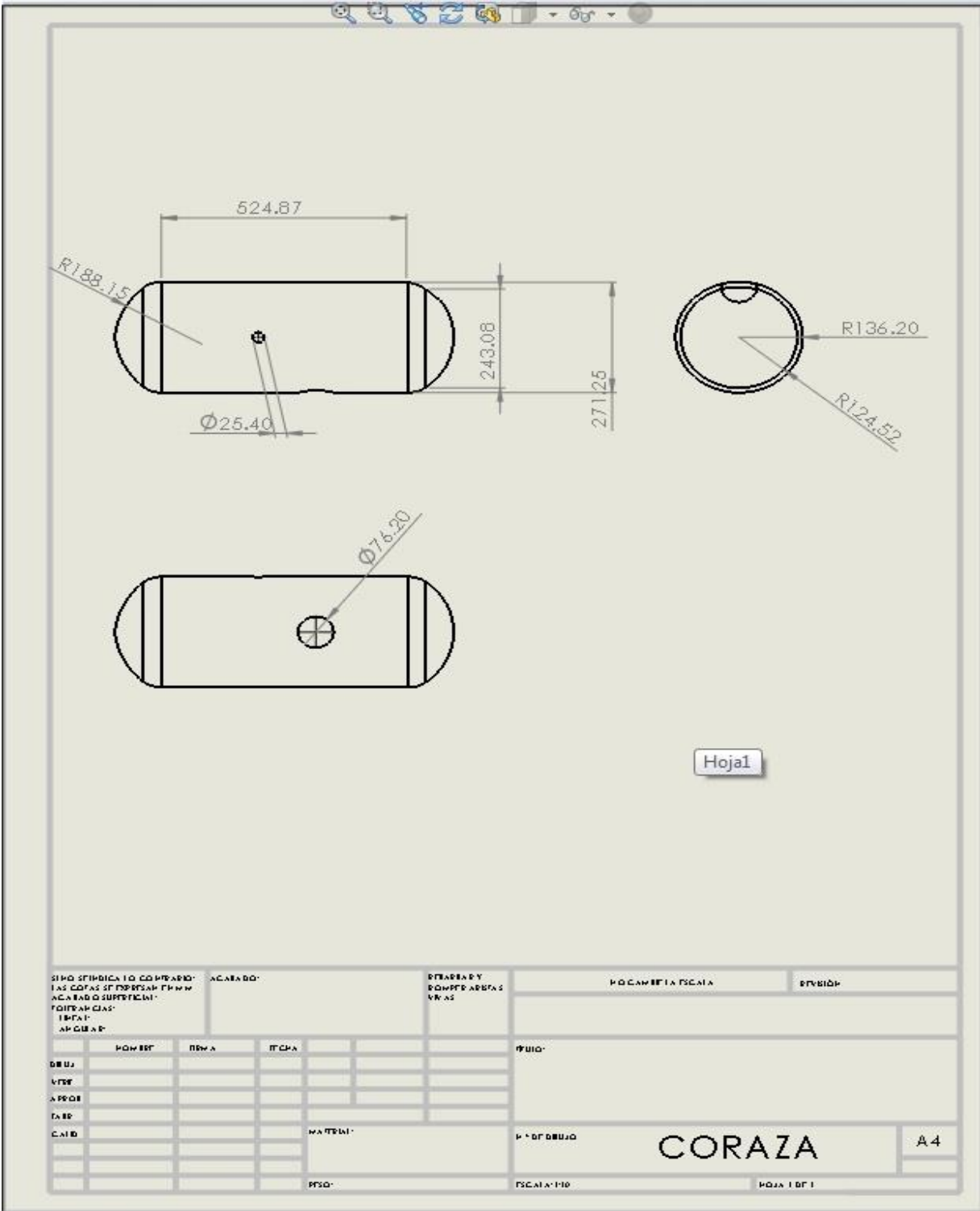


Figura 18 Coraza



Figura 19 Ensamblaje de recuperador de calor

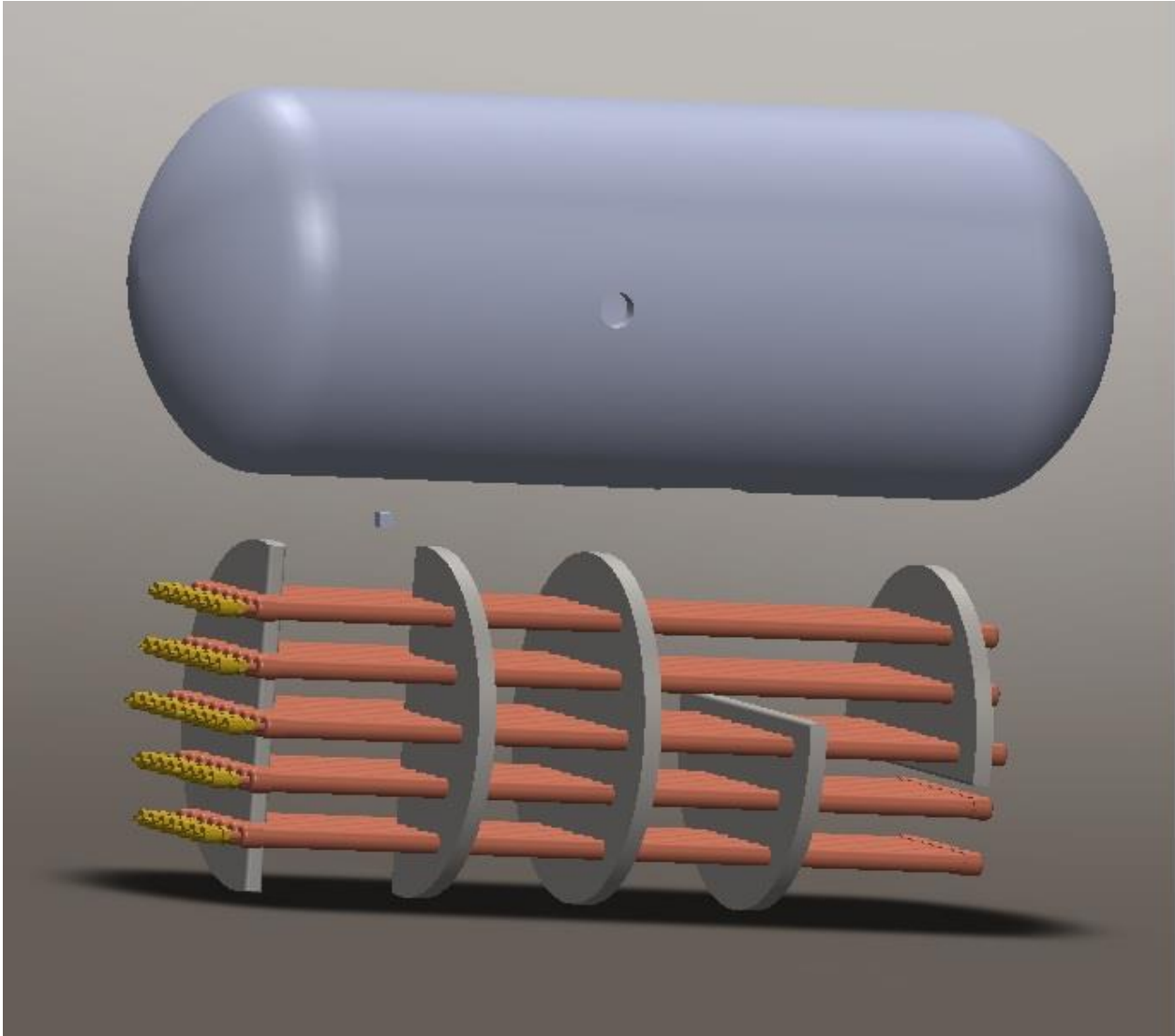
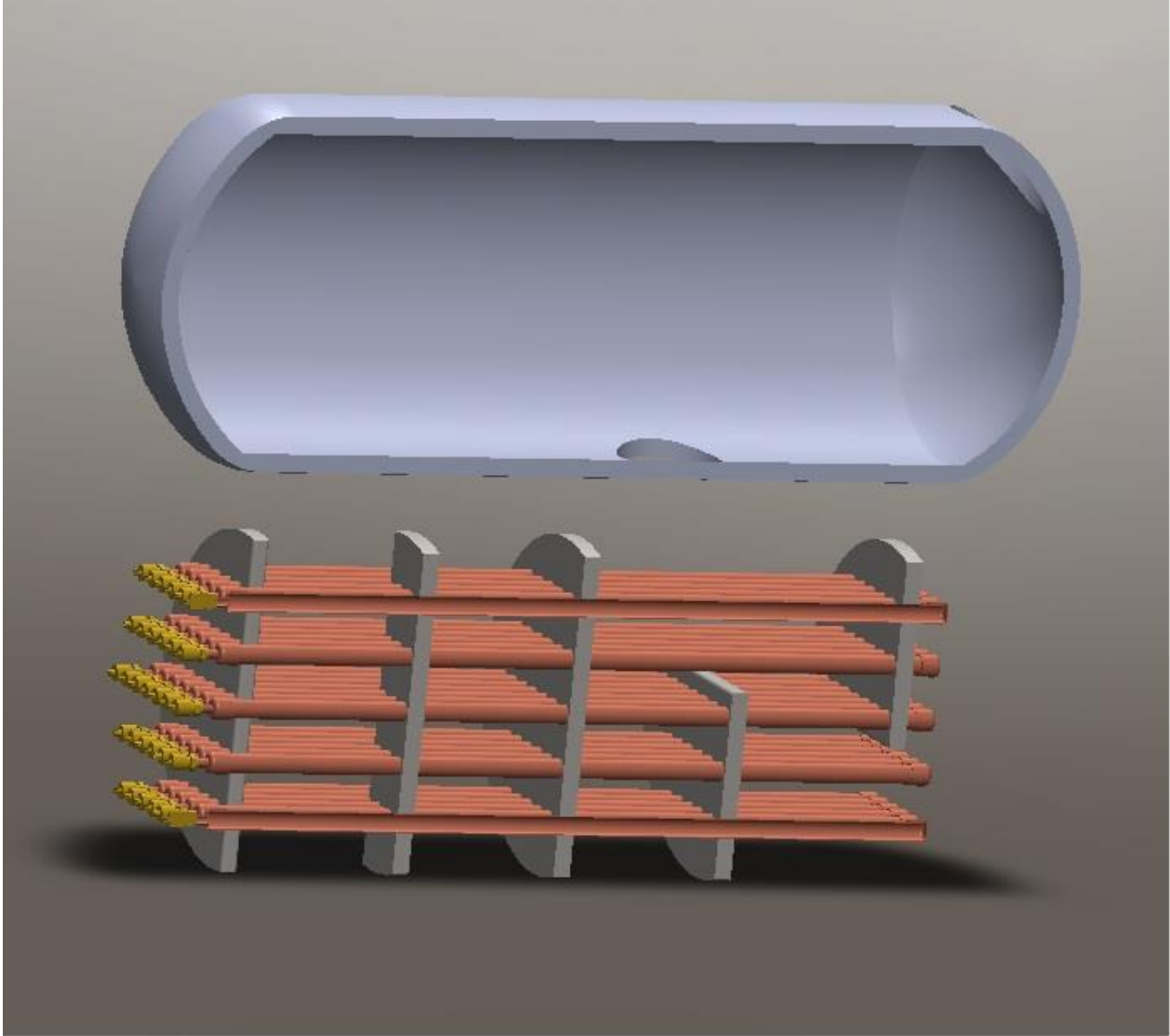


Figura 20 Ensamblaje de recuperador de calor



*Figura 21 Ensamblaje de recuperador de calor*



## J. Simulación en software Aspen Exchanger Desing & Rating V9

Hoja de especificaciones del recuperador de calor


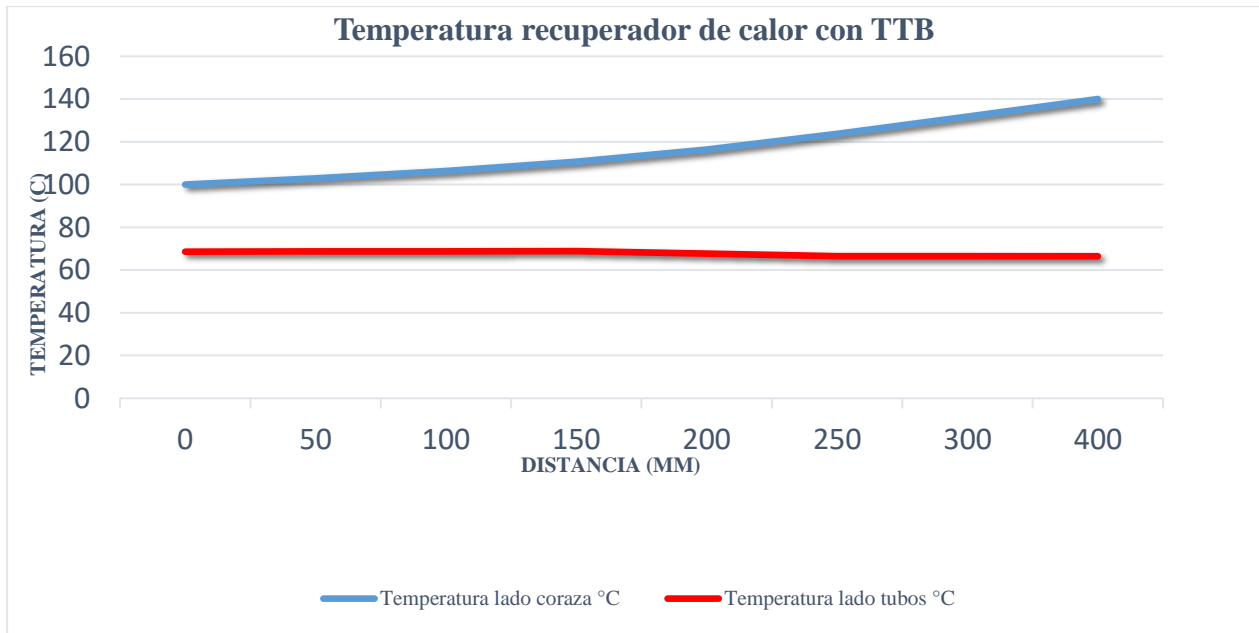
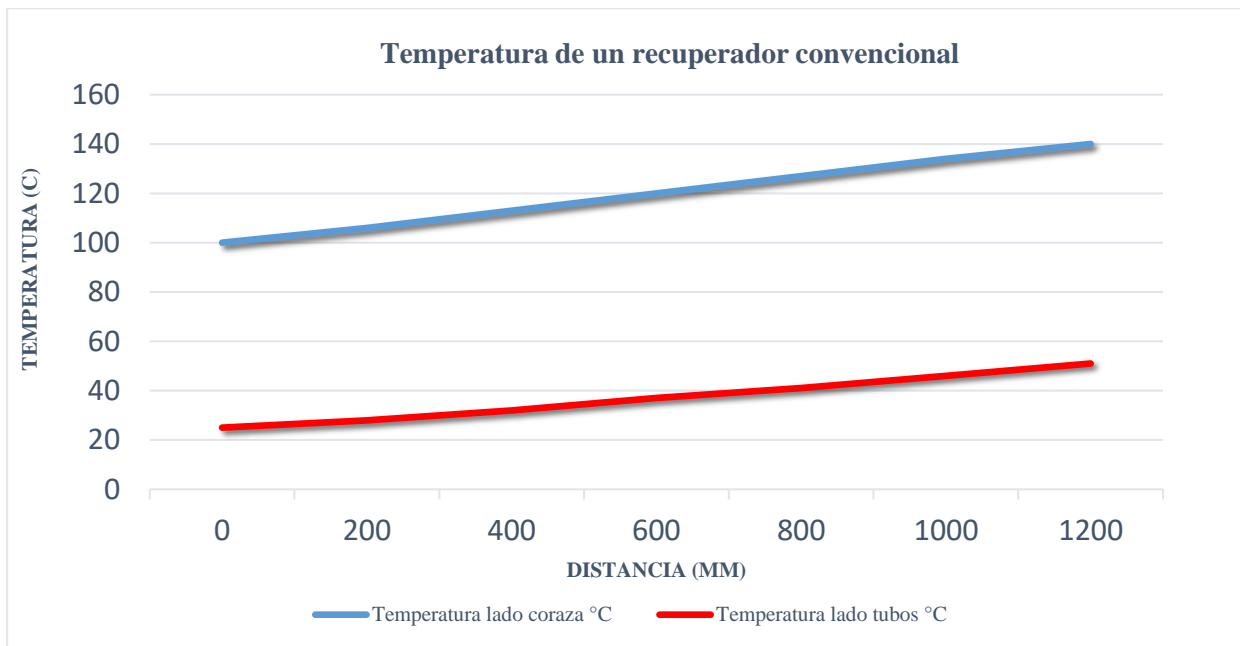
TEMA Sheet												
Heat Exchanger Specification Sheet												
1	Company: oscar											
2	Location: apan											
3	Service of Unit:			Our Reference:								
4	Item No.:			Your Reference:								
5	Date:	Rev No.:	Job No.:									
6	Size :	152 - 400	mm	Type:	BEM	Vertical	Connected in:			1 parallel	1 series	
7	Surf/unit(eff.)	0.7	m <sup>2</sup>	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)			0.7	m <sup>2</sup>		
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT											
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side					
10	Fluid name			air			water					
11	Fluid quantity, Total			121			201					
12	Vapor (In/Out)			121			0			2		
13	Liquid			0			201			199		
14	Noncondensable			0			0			0		
15												
16	Temperature (In/Out)			140			100.02			89.57	89.69	
17	Dew / Bubble point										89.91	
18	Density Vapor/Liquid			28.93 /			31.97 /			/ 966.76		0.41 / 966.67
19	Viscosity			0.023 /			0.0216 /			/ 0.3122		0.0119 / 0.3117
20	Molecular wt, Vap			28.96			28.96					18.01
21	Molecular wt, NC											
22	Specific heat			kcal/(kg-C) 0.2484 /			0.2481 /			/ 1.0009		0.4891 / 1.0009
23	Thermal conductivity			kcal/(h-m-C) 0.033 /			0.029 /			/ 0.577		0.02 / 0.577
24	Latent heat			kcal/kg								543.7
25	Pressure (abs)			kgf/cm <sup>2</sup> 35			34.988			0.716		0.703
26	Velocity (Mean/Max)			m/s 0.23 / 0.4						0.16 / 0.32		
27	Pressure drop, allow./calc.			kgf/cm <sup>2</sup> 0.502			0.012			0.265		0.013
28	Fouling resistance (min)			m <sup>2</sup> -h-C/kcal 0						0		0 Ao based
29	Heat exchanged			1.4 kW			MTD (corrected)			25.6		°C
30	Transfer rate, Service			65.2			Dirty 65.2			Clean 65.2		kcal/(h-m <sup>2</sup> -C)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									Sketch 		
32				Shell Side			Tube Side					
33	Design/Vacuum/test pressure			kgf/cm <sup>2</sup> 38.749 / /			3.059 / /					
34	Design temperature			°C 175			85					
35	Number passes per shell			1			2					
36	Corrosion allowance			mm 3.18			3.18					
37	Connections			In mm 1 13.3 / -			1 41.1 / -					
38	Size/Rating			Out mm 1 18.9 / -			1 41.1 / -					
39	ID			Intermediate / -			/ -					
40	Tube No.	18	OD	39.1	Tks Average	1.2	mm Length	400	mm Pitch		48.88	mm
41	Tube type	Plain	#/m		Material	Copper	Tube pattern	30				
42	Shell	Carbon Steel	ID	152.4	OD	166.6	mm	Shell cover			-	
43	Channel or bonnet	1/2Cr1/2Mo				Channel cover					-	
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating					-	
45	Floating head cover	-				Impingement protection					None	
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	49	V <sub>i</sub> Spacing: c/c	145			mm	
47	Baffle-long	-	Seal Type				Inlet	126.48			mm	
48	Supports-tube	U-bend	0				Type					
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint					Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')		
50	Expansion joint	-				Type					None	
51	RhoV2-Inlet nozzle	2025	Bundle entrance	1	Bundle exit	4					kg/(m-s <sup>2</sup> )	
52	Gaskets - Shell side	-				Tube side					Flat Metal Jacket Fibe	
53	Floating head	-										

Figura 22 Cuadro de desempeño del recuperador de calor



Gráfica de temperatura intercambiador de calor utilizando TTB.



Gráfica de temperatura intercambiador de calor convencional.

## MATERIALES DE FABRICACIÓN DE TTB

TTB		
Tubo 3/4 “	Cobre	BWG 14
Tapón 3/4”	Cobre	BWG 14
Válvula de servicio 1/4”	–	–
Soldadura	Plata	1/8”
Fundente	SILVER FLUX	–
Bomba de vacío	DV-200N	–
Manómetros de servicio	PRO-SET	–
Agua destilada	MEXOCHEM	–





*Tabla 6 Materiales de fabricación de TTB*




## MATERIALES DE FABRICACIÓN DE CORAZA

<b>CORAZA</b>		
Tubo 10"	Acero al carbón	ASTM/ASME SA-285-C espesor de 5/16"
Cabezal semi esférico	Acero al carbón	ASTM/ASME SA-285-C espesor de 5/16"
Niple 3"	Tubo acero al carbón	Cédula 80
Cople	Acero al carbón	Cédula 60
Placa de choque	Acero al carbón	ASTM/ASME SA-285-C espesor de 1/8"
Deflectores	Acero al carbón	ASTM/ASME SA-285-C espesor de 3/16"
Espejo	Acero al carbón	ASTM/ASME SA-285-C espesor de 5/16"
Soldadura	Bronce	1/8"
Fundente	FLUX WELD 246	–
Soldadura	SMAW-7018	1/8"

Tabla 7 Materiales de fabricación de coraza

## PROCESO DE FABRICACIÓN TTB

No.	Actividad	Fotografía
1	Corte de tubo	
2	Limado	
3	Limpieza de partes a unir	
4	Aplicación de pasta fundente	

<p><b>5</b></p>	<p>Ensamblado de válvula de servicio</p>	
<p><b>6</b></p>	<p>Aplicación de calor</p>	
<p><b>7</b></p>	<p>Aplicación de soldadura</p>	
<p><b>8</b></p>	<p>Limpeza la unión</p>	







<p><b>9</b></p>	<p>Llenado con agua bidestilada</p>	
<p><b>10</b></p>	<p>Se realiza vacío a tubo</p>	

Tabla 8 Proceso de fabricación de TTB

## PROCESO DE FABRICACIÓN DE CORAZA

No.	Actividad	Fotografía
1	Corte de tubo	
2	Limado	
3	Limpieza de partes a unir	
5	Ensamblado de la pieza	






<p><b>6</b></p>	<p>Aplicación de soldadura por electro deposito (arco eléctrico)</p>	
-----------------	--	--

Tabla 9 Proceso de fabricación de coraza

## PROCESO DE ENSAMBLAJE

No.	Actividad	Fotografía
<p>1</p>	<p>Se unen los tubos termosifones a espejos y baffles</p>	
<p>2</p>	<p>Se realiza prueba de hermeticidad de los tubos termosifones aplicando aire comprimido a 6 bar</p>	

<p><b>3</b></p>	<p>Se agrega 200 ml de fluido de trabajo (agua destilada)</p>	
<p><b>5</b></p>	<p>Se genera vacío en cada uno de los tubos, con ayuda de una bomba de vacío</p>	
<p><b>6</b></p>	<p>Se soldán a la coraza los conectores de entrada y salida del lado del evaporador</p>	
<p><b>7</b></p>	<p>Se soldán a la coraza los conectores de entrada y salida del lado del condensador</p>	

<p><b>8</b></p>	<p>Se introducen los tubos del lado del condensador de la coraza y se solda el espejo a la coraza</p>	
<p><b>9</b></p>	<p>Se coloca la otra mitad de la coraza, se bisela y se solda</p>	
<p><b>10</b></p>	<p>Se realiza limpieza y se aplica pintura</p>	

Tabla 10 Proceso de ensamblaje

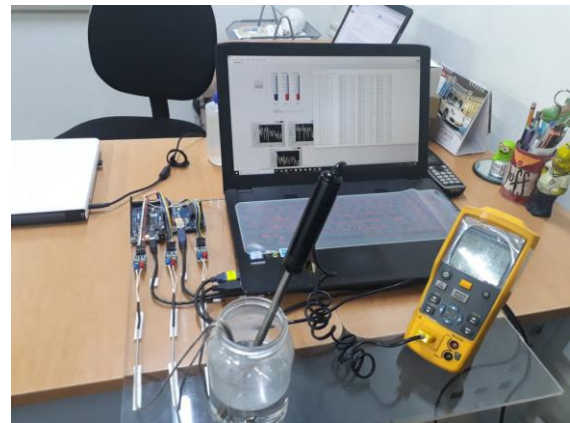
## K. Adquisición de datos de temperatura

Para aprender a utilizar las plataformas de adquisición de datos, tome el curso de adquisición, control y monitoreo de datos con LABVIEW y ARDUINO impartido por el Ing. Alejandro en un curso online de UC PROYECTOS UC.

Para la instrumentación de la medición de temperatura transferida en el recuperador de calor entre los fluidos caliente y frío, se diseñó la adquisición de datos utilizando dos plataformas de programación ARDUINO y LABVIEW y así poder registrar en tiempo real la temperatura del aire comprimido en la entrada y salida del recuperador de calor; la temperatura absorbida por el agua. Comparando las temperaturas se determinará la eficiencia térmica del recuperador de calor.

El material utilizado es el siguiente:

- Termocuplas tipo k
- Modulo Arduino MAX665
- Tarjeta ARDUINO UNO
- Software ARDUINO 1.8.0
- Software LABVIEW 2017



*Fotografía medición de temperatura*

Se prueba el diseño a diferentes temperaturas utilizando agua para introducir los termopares y estos se encuentren en las mismas condiciones térmicas, se compara con un calibrador de temperaturas de la marca FLUKE modelo 714B encontrando diferencia en las lecturas de temperatura hasta de  $1.3^{\circ}\text{C}$  entre termocuplas y una desviación de  $4.6^{\circ}\text{C}$  comparado con la medición del calibrador de temperatura FLUKE.

NOTA: estoy investigando y realizando pruebas para reducir la variación de temperatura entre termocuplas y poder determinar un factor de corrección.



*Fotografía de pantalla de medición de temperatura*

Se propone la toma de temperatura en 4 puntos; punto 1 entrada de fluido caliente, punto 2 salida de fluido caliente, punto 3 entrada de fluido frio y punto 4 salida de fluido frio; como se muestra en el siguiente diagrama

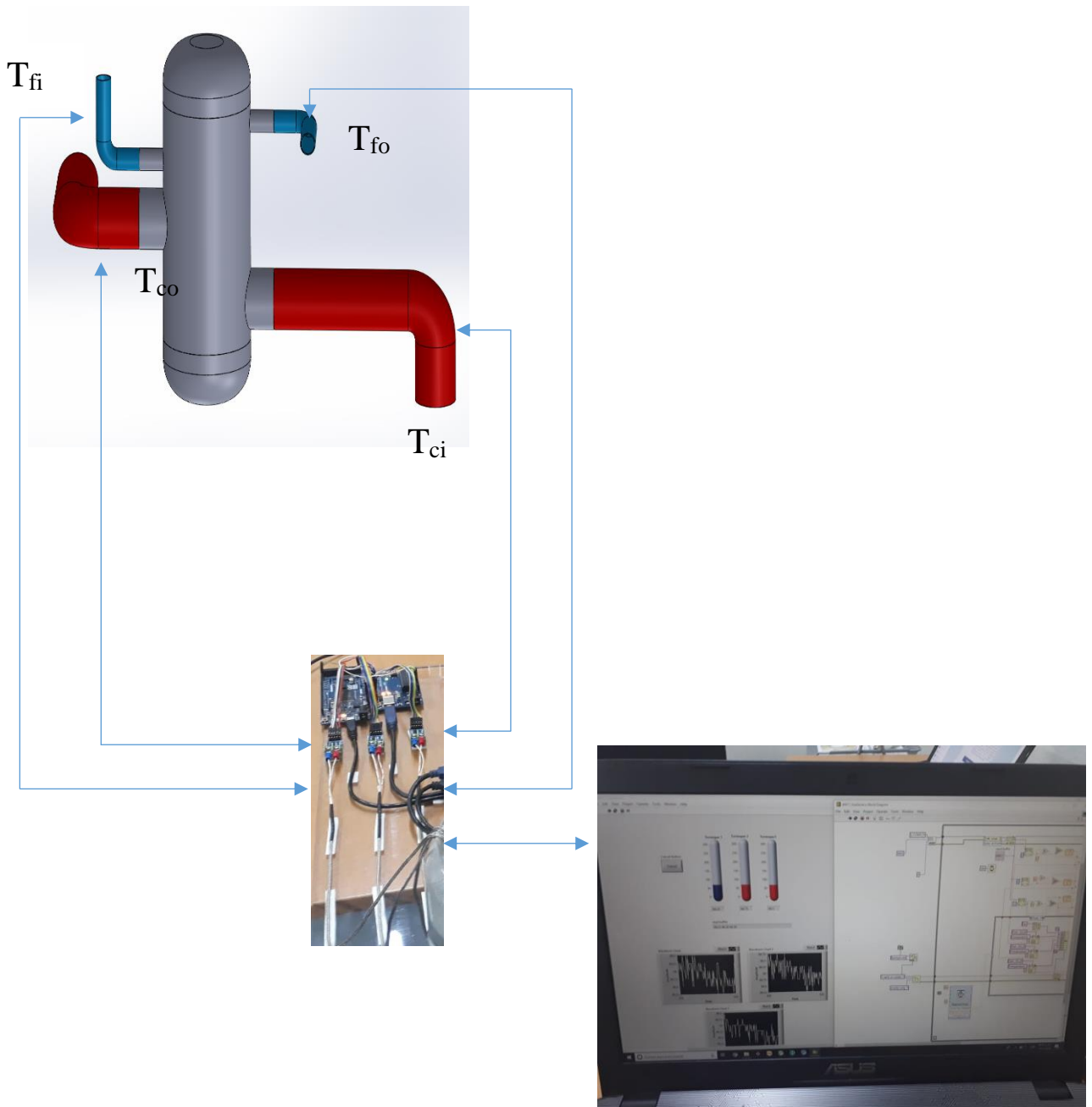


Figura 25 Diagrama de toma de temperatura

## 8. CONCLUSIONES

Un recuperador de calor es un equipo de transferencia térmica capaz de transferir calor latente de un fluido caliente a uno frío, sin partes móviles.

Este recuperador de calor puede soportar presiones mayores a 600 lb en el lado de evaporización, puede transferir 88.78 KW de calor latente, el uso de los TTB mejora considerablemente la velocidad de transferencia de calor de la zona de evaporización a la zona de condensación ya que aprovecha el cambio de fase del fluido de trabajo modificando su entalpia con una velocidad 10 veces mayor a la de una barra sólida.

El recuperador de calor utilizando TTB es 2.5 veces más compacto que un intercambiador de calor convencional de tubos y coraza, sometido a las mismas condiciones, la reducción de tamaño lo hace más barato, versátil, menos pesado que un intercambiador de calor de tubos y coraza; recomiendo que posterior a este trabajo se someta a las pruebas hidrostáticas de laboratorio como lo marca la NOM-020-STPS-2011 para recipientes sujetos a presión.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Procesos de transferencia de calor (1999) “Cálculo de los intercambiadores de tubo y coraza”. Kern Q Donald. Continental 1999.
- [2] Tesis doctoral carrera de doctorado en ingeniería nuclear (2003) “Análisis del modelo de dos fluidos en flujo bifásico totalmente desarrollado”. Ing. Oswaldo Azpitarte. Universidad Nacional de Cuyo Argentina 2003.
- [3] 8º Congreso Iberoamericano de ingeniería Mecánica (2007) “Tubos de calor y termosifones bifásicos: alternativas para la conservación de energías”. Msc.IM. Luis Santiago Paris Londoño. Universidad EAFIT. Oct. 23 al 25, 2007.
- [4] Applied Thermal Engineering (2009) “Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283”. Elsevier. Ago 2009.
- [5] International communications in heat and mass transfer (2009) “Performance enhancement of a two-phase closed thermosiphon with a thin porous coating”. Elsevier. Feb, 2017.
- [6] Memorias del XVII Congreso internacional anual de la SOMIM (2011) “Estudio analítico-experimental de operación de un tubo termosifón bifásico TTM”. Abdiel Gómez Mercado, José Alain Díaz Flores. Instituto Tecnológico de Pachuca. Sep. 21 al 23, 2011.
- [7] International Journal Of Heat and Mass Transfer (2013) “Thermal characteristics of a closed thermosyphon under various filling conditions”. Hamidreza Shabgard, Bin Xiao, Amir Faghri, Ramesh Gupta, Walter Weissman. Elsevier 2013.
- [8] Scientia et technica Vol.20 (2015) “Desarrollo de un prototipo recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y coque”. Oscar Castaño Gallego. Instituto Tecnológico Metropolitano. Colombia Dic 2015.
- [9] Memorias del XXII Congreso internacional anual de la SOMIM (2016) “Caracterización de un recuperador de calor con tubos termosifones bifásicos mediante ASPEN”. Abdiel Gómez Mercado, Alexis Nohemí Ángeles Morelos, Celerino Reséndiz Rosas. CD. Mérida Yucatán México. Sep. 2016.
- [10] [www.marcombo.com/...SolidWorks/descarga\\_primer\\_capitulo\\_libro\\_solidworks.pdf](http://www.marcombo.com/...SolidWorks/descarga_primer_capitulo_libro_solidworks.pdf), Rev. 16 de octubre de 2017.
- [11] <https://home.aspentech.com/en/products/pages/activated-exchanger-design-and-rating>, Rev. 16 de octubre de 2017.
- [12] Enriquez Alejandro (septiembre, 2018) Labview y Arduino. Curso online de UC PROYECTOS UC.
- [13] <https://www.intercambiadores-calor.com/norma-tema>. 23 agosto de 2018.
- [14] Guia del código asme sección VIII división 1. (2018).