

**DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
TECNOLOGÍA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO  
DE UN MOLDE DE ACERO MEDIANTE UN INTERCAMBIADOR DE  
CALOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ROTOMOLDEO**

**RESIDENTE  
FARRERA MEJÍA FRANCISCO JAVIER**

**ASESOR INTERNO  
ING. PEDRO TOMAS ORTIZ Y OJEDA  
ASESOR EXTERNO  
DR. NICOLAS JUAREZ RODRIGUEZ**

**TUXTLA GUTIERREZ, CHIS. JUNIO 2015**

## Contenido

<b>JUSTIFICACION DEL PROYECTO</b> .....	6
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	6
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b> .....	6
<b>CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ</b> .....	6
<b>Misión</b> .....	7
<b>Visión</b> .....	7
<b>Organigrama</b> .....	8
<b>AREA DONDE SE REALIZO EL PROYECTO</b> .....	9
<b>PROBLEMAS A RESOLVER</b> .....	9
<b>Elaboración de la ingeniería conceptual del proyecto</b> .....	9
<b>Elaboración de ingeniería básica del sistema</b> .....	9
<b>Elaboración de ingeniería de detalle del sistema</b> .....	10
<b>ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	10
<b>Alcances</b> .....	10
<b>Limitaciones</b> .....	10
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	11
<b>Proceso de rotomoldeo</b> .....	11
<b>Ventajas y desventajas del proceso de rotomoldeo</b> .....	13
<b>Materiales de rotomoldeo</b> .....	14
<b>Características generales de los polímeros</b> .....	14
<b>Polietileno (PE)</b> .....	15
<b>Moldes</b> .....	16
<b>Equipos de rotomoldeo</b> .....	17
<b>Equipo de rotomoldeo tipo carrusel</b> .....	17
<b>Equipo de rotomoldeo de desplazamiento lineal o tipo shuttle</b> .....	18
<b>Equipo de rotomoldeo tipo almeja o clamshell</b> .....	18
<b>Equipo de rotomoldeo tipo rock-and-roll</b> .....	19
<b>Equipo de rotomoldeo con calentamiento directo</b> .....	20
<b>Equipo de rotomoldeo con calentamiento por resistencias</b> .....	20
<b>Sistema de calentamiento con aceite térmico</b> .....	20
<b>Sistema de líquido térmico</b> .....	21

<b>Propiedades y limitaciones del aceite térmico.....</b>	<b>22</b>
<b>Tipos de calentadores.....</b>	<b>24</b>
<b>Líquidos Térmicos o Aceites .....</b>	<b>26</b>
<b>Intercambiador de calor .....</b>	<b>27</b>
<b>Tipos de intercambiadores de calor.....</b>	<b>28</b>
<b>Coeficiente de transferencia de calor .....</b>	<b>30</b>
<b>Mecanismos físicos de la convección.....</b>	<b>33</b>
<b>Número de Nusselt .....</b>	<b>34</b>
<b>Numero de Prandtl.....</b>	<b>34</b>
<b>Clasificación de los flujos de fluidos.....</b>	<b>34</b>
<b>Flujo laminar .....</b>	<b>35</b>
<b>Flujo turbulento .....</b>	<b>36</b>
<b>Transferencia de calor .....</b>	<b>36</b>
<b>Convección interna forzada .....</b>	<b>36</b>
<b>Numero de Nusselt para flujo laminar .....</b>	<b>38</b>
<b>Flujo constante de calor en la superficie para flujo laminar .....</b>	<b>38</b>
<b>Temperatura superficial constante flujo laminar .....</b>	<b>39</b>
<b>Numero de Nusselt para flujo turbulento .....</b>	<b>40</b>
<b>Convección externa forzada.....</b>	<b>41</b>
<b>Equipo de bombeo.....</b>	<b>43</b>
<b>Clasificación general de las bombas.....</b>	<b>43</b>
<b>Diseño del Sistema.....</b>	<b>45</b>
<b>Bombas de recirculación de líquido térmico.....</b>	<b>46</b>
<b>Bomba centrífuga La UPE de Grundfos.....</b>	<b>47</b>
<b>Bomba recirculadora GRAINGER .....</b>	<b>48</b>
<b>La serie cn: química normalizada iso 2858/iso 5199 pn16 de impulsor cerrado.....</b>	<b>49</b>
<b>GRUNDFOS ALPHA Pro, GRUNDFOS ALPHA+, UPS, UP Serie 100 .....</b>	<b>50</b>
<b>Ventiladores.....</b>	<b>50</b>
<b>Procedimiento.....</b>	<b>52</b>
<b>RESULTADOS, PLANOS, GRAFICAS, PROTOTIPOS Y PROGRAMAS.....</b>	<b>56</b>
<b>Molde para intercambiador de calor .....</b>	<b>56</b>
<b>Análisis del sistema de calentamiento.....</b>	<b>57</b>
<b>Análisis del sistema de enfriamiento.....</b>	<b>59</b>

<b>Instalación hidráulica selección de bombas</b> .....	61
<b>Líneas de calentamiento</b> .....	62
<b>Líneas de enfriamiento</b> .....	62
<b>SIMULACION</b> .....	62
<b>CONCLUSIONES</b> .....	64
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	65

#### INDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1 logotipo de la empresa.....	8
Ilustración 2 molde 450L.....	11
Ilustración 3 proceso de rotomoldeo.....	12
Ilustración 4 macromoléculas de los tipos de polímero.....	16
Ilustración 5 equipo tipo carrusel marca caccia.....	18
Ilustración 6 equipo tipo shuttle.....	18
Ilustración 7 equipo tipo almeja marca ferry .....	19
Ilustración 8 equipo tipo rock and roll marca rotoline .....	19
Ilustración 9 esquema de molde con calentamiento eléctrico.....	20
Ilustración 10 equipo de rotomoldeo automatizado marca Leonardo .....	20
Ilustración 11 esquema caldera eléctrica .....	24
Ilustración 12 características caldera eléctrica .....	24
Ilustración 13 potencias calentador eléctrico .....	24
Ilustración 14 calentador de fluido térmico con serpentín.....	25
Ilustración 15 calentador de fluido térmico vertical diseño anular .....	25
Ilustración 16 intercambiador de serpentín sumergido.....	28
Ilustración 17 intercambiador de calor de tubo doble .....	28
Ilustración 18 intercambiador de calor de coraza y haz de tubos.....	28
Ilustración 19 intercambiador de calor de cascada.....	29
Ilustración 20 intercambiador de calor encamisado.....	29
Ilustración 21 intercambiador de calor de placa .....	29
Ilustración 22 intercambiador de calor de flujo cruzado .....	30
Ilustración 23 geometría del haz de tubo.....	30
Ilustración 24 resistencia térmica de intercambiador de tubo doble .....	31
Ilustración 25 tubo doble .....	31
Ilustración 26 placas paralelas .....	33
Ilustración 27 tipo de flujo .....	35
Ilustración 28 haz de tubos .....	41
Ilustración 29 bando de tubos alineados .....	42
Ilustración 30 banco de tubos escalonados .....	42
Ilustración 31 número de nusselt sobre banco de tubos.....	43
Ilustración 32 bomba centrífuga .....	44
Ilustración 33 perdida por accesorio.....	46

Ilustración 34 diagrama de moody .....	46
Ilustración 35 bomba recirculadora .....	47
Ilustración 36 bomba recirculadora upe .....	47
Ilustración 37 grafica funcionamiento de recirculadora upe .....	48
Ilustración 38 bomba recirculadora grainger .....	48
Ilustración 39 bomba recirculadora serie CN .....	49
Ilustración 40 vista interior bomba recirculadora serie cn .....	49
Ilustración 41 bomba recirculadora grundfos alpha .....	50
Ilustración 42 grafica bomba recirculadora alpha .....	50
Ilustración 43 extractores tubulares TAT .....	51
Ilustración 44 extractor tubular con motor exterior TTB-T.....	51
Ilustración 45 extractores axiales.....	52
Ilustración 46 propiedades de molde de 450L rotoinnovacion .....	53
Ilustración 47 molde base de 450L.....	56
Ilustración 48 tubo en forma de serpentín .....	56
Ilustración 49 tubería de calentamiento y enfriamiento vista isométrica .....	61
Ilustración 50 instalación hidráulica.....	61
Ilustración 51 perfil de velocidad .....	63
Ilustración 52 temperatura de superficie.....	63
Ilustración 53 flujo de calor.....	63
Ilustración 54 simulación de flujo de calor molde .....	64
Ilustración 55 simulación de flujo de calor molde 2 .....	64

## INTRODUCCIÓN

El moldeo rotacional (rotomoldeo) es un proceso en el que un polímero plástico es fundido por la adición de calor el cual se encuentra dentro de un molde que gira en diferentes planos con el propósito de que este cubra toda la superficie interna del molde para así adopte su forma es decir, consta de cuatro etapas el cual emplea un molde cerrado de paredes delgadas y fabricado con materiales que posean una alta capacidad de transferencia de calor. En el molde se requiere una entrada para la alimentación de materia prima, también debe ser diseñado para separarse en secciones y de ésta forma retirar las piezas solidificadas en su interior.

Para él proceso, se coloca una cantidad conocida de plástico pulverizado en el interior del molde, que rota simultáneamente en dos ejes perpendiculares; con la rotación lenta del molde, el material se adhiere a las paredes calientes y cubre toda la superficie homogéneamente. Este principio de operación hace que el material pueda adquirir una diversidad importante de configuraciones para formar piezas de diferentes tamaños, y queda distribuido en toda la superficie con un espesor uniforme.

En general el rotomoldeo parece un proceso de manufactura sencillo, sin embargo, puede llegar a ser tan complejo como se requiera debido a la geometría y configuración del molde, las características de la pieza a fabricar, los materiales empleados. Aun así las etapas por las que debe pasar serán las mismas, esto ha llevado a la generación de una variedad de máquinas de diferentes tamaños y formas, que llevan a cabo el proceso, desde equipos de gran tamaño hasta las más reducidas.

Dicho esto los métodos para aplicar calor son muy variados y difieren en su eficiencia tales como: El rotomoldeo por flama abierta el calentamiento se realiza por mecheros que rodean al molde al aire libre. Lo que provoca que la mayor parte del calor se disipe al medio ambiente. Por otro lado estas máquinas no pueden hacer giros biaxiales al mismo tiempo. Están sometidas a realizar giros de 360 grados y el siguiente giro lo tienen en aproximadamente 45 grados. Razones por la cual no se pueden realizar piezas complejas por el método de llama abierta. En el método por horneado el molde es introducido en un horno cerrado en donde se hace girar lo cual le permite un mejor control de los parámetros de temperatura. El siguiente método se refiere a las resistencias eléctricas, cuyo caso puede ser empleado de diferente manera primeramente se posicionan a una distancia razonable de forma tal de se concentre como en un horno fluyendo de forma de radiación hacia el elemento o en contacto directo logrando que la cantidad de potencia sea mejor aprovechada ya que la pérdida de potencia va en razón de la eficiencia del aislante que recubre las resistencias y el molde, otro de los métodos útiles para la aplicación de energía es el calentamiento por inducción, es un método que al día es aplicado para la fundición por la gran eficiencia en el proceso, trabaja con grandes cantidades de calor con poca potencia puesto que el flujo de calor viene del interior del material a diferencia de la resistencia que este comienza de la superficie y continúa lo que beneficia a una menor cantidad de calor desperdiciada, por último tenemos el método de calentamiento que involucra a un intercambiador de calor tema que abordaremos más afondo, esta opción a diferencia de los métodos anteriores requiere de una modificación en el molde puesto que se requiere hacer pasar un fluido de trabajo, el cual ingresara entre unos tubos en forma de serpentín que envolverá a todo el elemento, de modo que el fluido transferirá su energía a la pared interna del molde para que así alcance su temperatura de trabajo y lograr la sintonización del polímero.

Este último método hace referencia a poder alcanzar una mejor eficiencia en la producción por el diseño que concentra el calor con mayor precisión.

## JUSTIFICACION DEL PROYECTO

En la producción de elementos rotomoldeados o en cualquier otro tipo de industria el aprovechamiento de los recursos primarios son indispensables para minimizar los gastos de operación.

La variedad de máquinas que se aplican en la industria del rotomoldeo se distinguen entre sí por la simple manera de aplicar calor al molde que las compone, la eficiencia derivada de la rapidez de producción y la cantidad de energía aprovechada por lo que al aplicar uno de los métodos con mayor eficiencia destaca en la reducción de costos ya que al maximizar la potencia disminuye el consumo de fuentes de energía. Esto se ve involucrado en que los productos rotomoldeados tendrían un gasto menor en su producción y por lo tanto la posibilidad de variar costos, lo que beneficiaría a la empresa y sus clientes ya que tendría precios competitivos al mercado propiciando a un aumento en su demanda al mercado de igual forma al trabajar con un proceso de mayor efectividad en cuanto a la inserción y extracción de calor acelera la producción lo que da como resultado el cumplir con la demanda generada, un sistema de calentamiento por líquido térmico es particularmente interesante, pues no tiene un horno ni una estación de enfriamiento o un quemador abierto (sistema de flama abierta) por el cual la pérdida de energía es evidente, sino que el molde se calienta y se enfría a través de intercambiadores de calor instalados en la pared del molde a lo que se le conoce como encamisado, es la unión de un molde y un serpentín que recorre toda la superficie del mismo para cumplir su único propósito el agregar y extraer energía. Como fluido de intercambio se usa aceite, que se hace pasar por estos canales. El calentamiento, de esta forma, puede localizarse en regiones específicas del molde, donde se puede introducir o remover más calor que en otras zonas lo que nos permite un mayor control.

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de calentamiento y enfriamiento para un molde para la producción de productos rotomoldeados mediante un intercambiador de calor con el propósito de aumentar su eficiencia

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Hacer el diseño conceptual de la maquina así como definir los componentes sistemas y demás equipos que sean necesarios para su funcionamiento.
- Realizar cálculos para la obtención de la potencia requerida para el moldeo rotacional y así enfocar en la selección de un calentador de líquido térmico.
- Una vez realizados los cálculos necesarios seleccionar los elementos principales que constituirán los sistemas tanto de enfriamiento como de calentamiento.

## CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ

Antecedentes de la empresa

Inicio el 2015 como una de las 11 Organizaciones finalistas de la XVI Edición del Premio Nacional de Tecnología e Innovación (PNTi). Ser finalistas significa el máximo reconocimiento empresarial de México y marca el inicio de un importante y sólido liderazgo a nivel nacional e internacional.

Rotoinnovación es una Compañía que está convencida de que las participantes de la XVI Edición del PNTi son organizaciones que buscan mejorar su desempeño y que promueven valores, sin duda alguna Rotoinnovación forma parte de esas organizaciones que participan activamente en hacer de México un mejor lugar para vivir. En los últimos años han desarrollado proyectos de innovación, han hecho historia al ganar de manera

consecutiva 5 proyectos PEI, es la empresa del sector de rotomoldeo que ha ganado los proyectos más grandes del PEI 2014 y 2015 en todo México, y con nuestra OTC han apoyado Empresas como la VW con la cual este 2015 gano el proyecto más grande en todo México. Los proyectos los han desarrollado en temas de interfaces inteligentes human-machine, visión, nano-polímeros, fundición de moldes de aleaciones especiales de aluminio y cerámicos, control y automatización, y energías renovables como la fotovoltaica.

Toda la Compañía inicia el 2015 certificada en ISO 9001:2008 (Validez EMA) y también inicio como OTC (OFICINA DE TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO) certificados por el CONACYT, Secretaria de Economía Federal e INADEM. Se sabe el enorme esfuerzo que está detrás de estos logros, por lo que la empresa da su más sincera felicitación a todo su valioso equipo de colaboradores.

Rotoinnovación S.A. de C.V, es una compañía de sea tecnológica que se dedica a la innovación, está apasionada a proporcionar una calidad superior y constante, y comprometida para asegurar discreción y confidencialidad total, y que nuestra actividad sea competitiva internacionalmente.

Ubicación de la empresa

9a Oriente-sur 973, Entre 2a Sur y 3a Sur,  
Barrio Lindavista,

C.P 29130  
Berriozábal, Chiapas.

### **Misión**

Ofrecer las mayores ventajas en el diseño y fabricación de productos, con el respaldo de la tecnología más avanzada, las mejores soluciones, y el cumplimiento total con el cliente superando sus expectativas con oportunidad y eficiencia, así como ganar su confianza por nuestra calidad, consistencia y una atención personalizada.

### **Visión**

Ser la mejor opción para nuestros clientes en la investigación científica y desarrollo de productos rotomoldeados, caracterizarnos por nuestra calidad, por utilizar tecnología ecológica y distinguimos por nuestra innovación permanente.

Hemos afianzado una alianza con empresas líderes y los laboratorios más modernos en nanotecnología, envejecimiento del plástico, pruebas de resistencia, moldes de fundición de aluminio, robótica, energía, diseño, etc.

Políticas

"En Rotoinnovación tenemos un compromiso con el medio ambiente, por eso creamos productos y servicios que cuidan y ahorran energía para nuestro planeta."

Rotoinnovación en su cumplimiento de su Visión, y en relación la instrumentación de proyectos clave para acelerar la transferencia de tecnología del rotomoldeo, ha creado la OTC Rotoinnovación. La Misión de la OTC es poner en valor y acelerar la transferencia de los resultados de la investigación y el desarrollo de proyectos, de forma proactiva y eficiente. Para ello enumera los siguientes principios que enmarcan la política de transferencia de Rotoinnovación S. A. de C. V.

- Experiencia.
- Conocimiento.
- Habilidad.



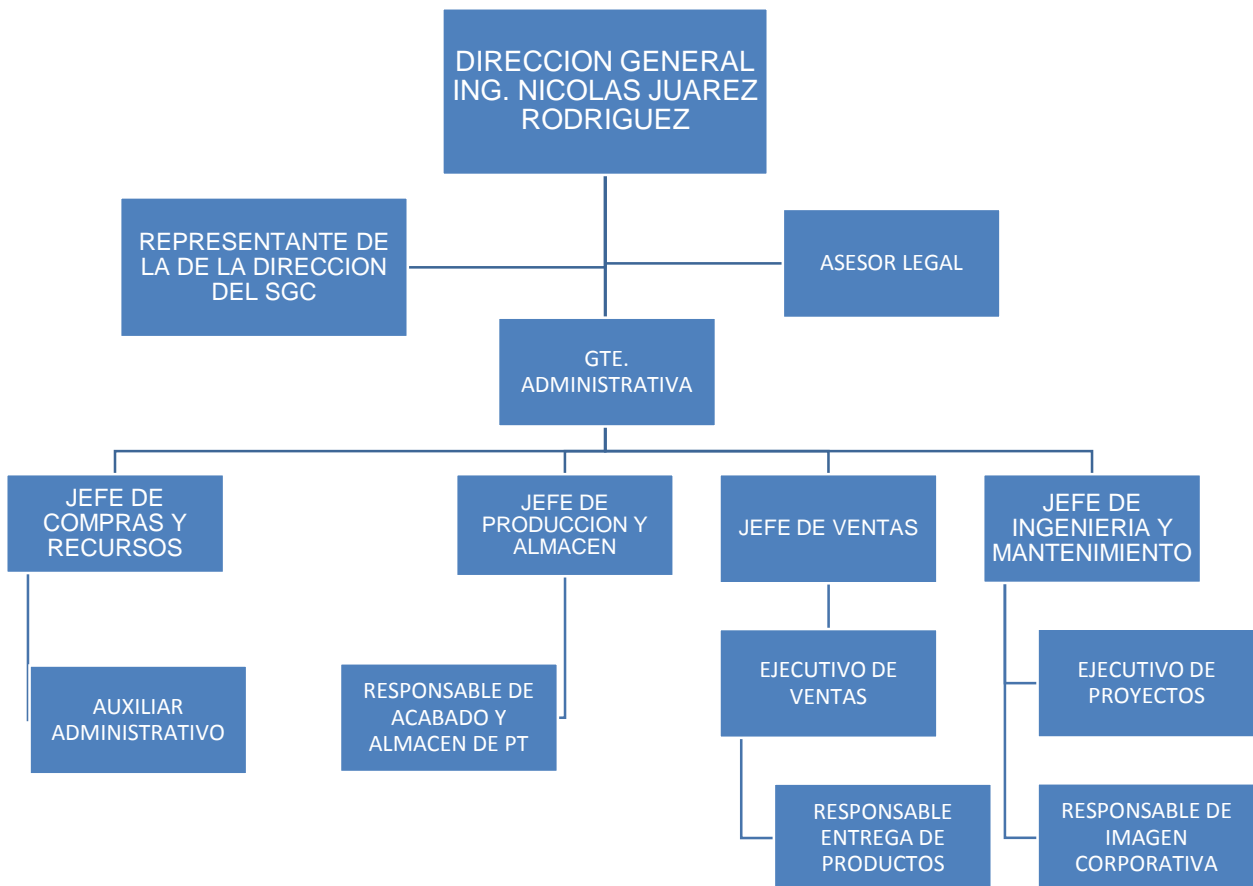
- Capacidad.
- Calidad.
- Superar las expectativas del cliente.
- Confidencialidad.
- Innovar.
- Eficiencia y ser oportuno.

Logo de la empresa



ILUSTRACIÓN 1 LOGOTIPO DE LA EMPRESA

**Organigrama**



### **AREA DONDE SE REALIZO EL PROYECTO**

La empresa de rotoinnovación como principal aporte es la de la transformación de polímeros en tinacos por lo tanto el desarrollo de su tecnología va desarrollada en principalmente la optimización de ese proceso.

El área de producción, lugar donde se lleva a cabo esta tarea, consta de un número limitado de máquinas todas con el mismo principio de funcionamiento al igual que su aplicación de calor (flama abierta), el cual consta de una eficiencia muy baja.

Todo el proceso se ve limitado a los tiempos de rotomoldeo, es necesario alcanzar la temperatura mínima para la operación y una gran cantidad de energía se ve perdida en el ambiente.

### **PROBLEMAS A RESOLVER**

El polímero que se emplea en la producción de artículos rotomoldeados, en este caso en particular el polímero de alta densidad que se usa para la producción de tinacos, requiere de una temperatura mínima para alcanzar las condiciones necesarias para su moldeo.

Por lo tanto el conocer la cantidad de potencia requerida para alcanzar esa temperatura y conocer su comportamiento es fundamental para la selección de los sistemas adecuados con fin de aminorar los riesgos de falla, así como el garantizar que la operación se encuentre en condiciones ideales.

Una vez finalizado el rotomoldeo la energía agregada al calentamiento debe ser retirada para su desmolde, por lo que es necesario eliminar ese calor generado con la aplicación de un radiador y el desarrollo de las líneas necesarias para su distribución y almacenaje.

#### **Elaboración de la ingeniería conceptual del proyecto**

Comienza por la recopilación de información en libros, revistas y artículos científicos, en los cuales se priorizo principalmente de todo lo relacionado con el avance logrado sobre el rotomoldeo hoy en día en el mercado, para así poder saber que máquinas existen, estableciendo los medios de aplicación de calor para proseguir con una comparación y de esta manera corroborar una eficiencia sobre las demás.

Reviso los componentes que involucra el proceso por intercambiador de calor tales como el calentador de líquido térmico que se encarga del ingreso del calor, el radiador que disipa el calor agregado y principalmente el molde apropiado para que la distribución de calor que proviene del calentador sea el suficiente.

Entre los libros de mayor interés como, "transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones de YUNUS A. CENGEL, AFSHIN J. GHAJAR" cuarta edición editorial Mc Graw Hill el cual cubre sólidamente las necesidades requeridas para los cálculos pertinentes que abarca las propiedades de energía y poder concluir con la investigación.

Por otro lado se analizan las áreas de trabajo desde sus antecedentes, además de esto se recolecto información de la política de calidad de esta misma, aquí también se adjuntaron los valores, misión y visión que ofrece la institución, y de la misma manera el organigrama para conocer más de ella, además se añade la ubicación, así como el área donde se realizara el trabajo dentro de la misma.

Basándose en la información obtenida se justifica el proyecto de manera razonable, y se forman objetivos.

#### **Elaboración de ingeniería básica del sistema**

El proceso de rotomoldeo se basa en principios básicos de funcionamiento, es por eso que se revisaron los componentes que se comprometen en la obtención de una alta eficiencia.

Un fluido de trabajo es necesario para este proceso en específico, es este por el cual se transferirá esa energía proveniente del calentador de líquido térmico, recorrerá el molde y finalizará en el radiador para la conclusión del procedimiento, por lo que es necesario analizar el fluido que se implementará, conocer sus propiedades físicas al igual que térmicas, puesto que como se mencionó siendo este el medio de transferencia de calor conociendo sus capacidades sabremos cómo se comportará el sistema.

Dicho lo anterior con el propósito de comprender más a fondo las aportaciones que estas partes tendrían en el sistema así como el cumplimiento de las mismas se concretan las ecuaciones necesarias para corroborar los requerimientos del proceso.

### **Elaboración de ingeniería de detalle del sistema**

De acuerdo a los principios básicos de funcionamiento se resaltaron las temperaturas que necesita alcanzar el molde con fin de que ocurra la sinterización del polímero de alta densidad, material ocupado para la fabricación de los tinacos, lo que nos lleva a analizar la propiedades del molde en cuanto al material que ocupa su fabricación, para tener conocimiento de acuerdo a los cálculos la cantidad de energía que se necesita para que la temperatura que se requiere sea alcanzada, posteriormente luego de alcanzar la temperatura tiene que disiparse en un tiempo razonable, lo que nos exige calcular las dimensiones del radiador que se empleará para que la cantidad de energía sea eliminada.

Una vez seleccionado los componentes de operación se requiere la formación del sistema de tubería que se encargará de distribuir el fluido térmico, lo que con lleva a la selección de una bomba que se encargue de cumplir con esa función.

Simulación de validación del proceso.

Después de realizar cálculos para la obtención de potencia tanto para el calentamiento como para el enfriamiento es necesario comprobar que la eficiencia energética es razonable.

Por lo que el CAD que nos permite desarrollar esa parte es el programa de diseño, solidworks, que permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción, en la cual se propone un boceto que incorporan los aditamentos imprescindibles para la formación del producto rotomoldeado, cuyo caso se constituye de un serpentín que encerrará todo el molde para una transferencia de calor más eficiente, el molde se formará con las especificaciones que plantea la planta, con las mismas medidas y precisa forma ya que de esta constituye de la identidad de la marca.

De lo resultante se plantea el transferir las potencias obtenidas para corroborar que el molde reaccionará como se planea y así concluir el sistema.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES.**

### **Alcances**

La aplicación de un método que requiere de un calentador de líquido térmico como fuente de calor aumenta su eficiencia por motivo que el fluido se encuentra almacenada en un contenedor en el cual se mantiene a una temperatura adecuada hasta el momento de su aplicación, lo que nos permite alcanzar la temperatura de operación con mayor rapidez pues la transferencia de calor trabaja con una temperatura elevada lo que es igual a una pérdida de calor al ambiente menor ya que al alcanzar más rápida la temperatura adecuada el proceso iniciaría de inmediato lo que se traduce a que el calor se transfiere al polímero.

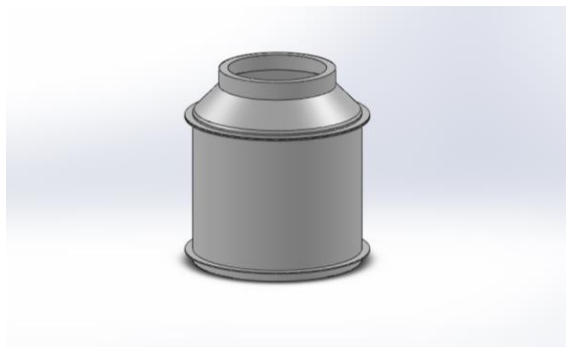
### **Limitaciones**

El costo de inversión inicial por el calentador de líquido térmico así como su mantenimiento ya que el aceite térmico que requiere el sistema llega a degradarse, motivo por el que es necesario

reemplazarlo de manera consecutiva de un mantenimiento para liberar al sistema de incrustaciones de carbón producidas por el aceite.

Una revisión constante del sistema para evitar fugas, manteniéndolo en un medio de alto grado de aislamiento térmico para evitar riesgos físicos.

La forma del molde ya establecida por la empresa por lo que el sistema no debe alterar las dimensiones de esta puesto que el molde cuenta con su propia identidad.



**ILUSTRACIÓN 2 MOLDE 450L**

## **FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **Proceso de rotomoldeo**

El moldeo rotacional o rotomoldeo es una técnica para conformar productos plásticos, en el cual se introduce un polímero en estado líquido o polvo dentro de un molde y éste al girar en dos ejes perpendiculares entre sí, adapta el material a la superficie del molde. Se crean piezas huecas de tamaño mediano a muy grande con relativamente poco material y buena estabilidad dimensional.

El proceso consta de 4 pasos sencillos pero esenciales aquellos por los que el rotomoldeo es una técnica simple y por lo tanto es posible realizar modificaciones para aumentar su eficiencia.

1.- Con anterioridad el proceso iniciaba introduciendo el material al molde y posteriormente era agregado el calor, pero por variaciones en la homogeneidad del producto se opta por comenzar en el calentamiento del molde es decir, se somete a un flujo de calor y simultáneamente se hace rotar sobre uno de sus ejes perpendiculares a fin de permitir que el molde se caliente de manera uniforme.

2.- una vez que alcanzo la temperatura ideal (180°C) se comienza agregar el material al interior del molde por medio de la abertura con la que cuenta, continúa la rotación a fin de permitir que el material se vaya adhiriendo poco a poco a la pared interna, las partículas en el proceso de rotomoldeo no se funden solo se sinterizan en los puntos de contacto, hasta formar una red tridimensional porosa

La etapa de calentamiento del molde y la sinterización de las partículas toma normalmente entre 15 y 40 minutos, para un molde de acero inoxidable. La duración de ésta etapa está directamente relacionada con el espesor de la pared en la pieza final, pues conforme el plástico se deposita sobre las paredes del molde, debido a su baja conductividad térmica, actúa como un aislante que disminuye la transferencia de calor hacia el material que todavía no se ha incorporado a las paredes. Además este proceso es importante ya que si la pieza no ha sido calentada lo suficiente no alcanzará sus propiedades mecánicas, de igual manera si el proceso de calentamiento es largo el polímero se degradará.

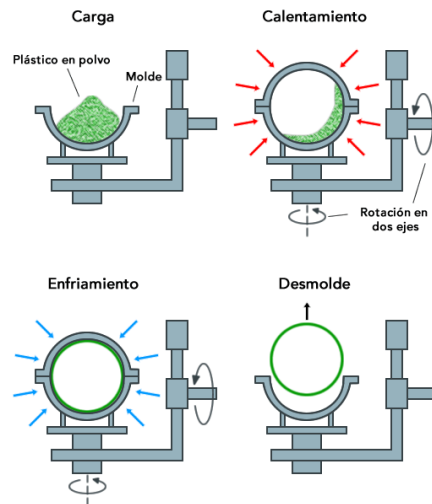
3.- Cuando todo el material plástico ha tomado la forma interna del molde, se procede a enfriarlo para que se endurezca y termine con las características buscadas, durante ésta etapa continúa la rotación, para garantizar uniformidad en la totalidad de la pieza, Como medio de enfriamiento

es posible usar agua fría dispersada en gotas sobre la superficie del molde, una corriente de aire con alto nivel de humedad o aire frío.

Durante ésta etapa se adquieren las propiedades mecánicas del material y depende de la velocidad de enfriamiento ya que a una velocidad rápida de enfriamiento, las propiedades obtenidas varían completamente de las que se obtendrían al realizar un enfriamiento a una velocidad lenta, por ejemplo al enfriar de manera lenta se aumenta la dureza y reduce la resistencia al impacto de la pieza, un enfriamiento rápido conlleva a una pieza con mayor rigidez y menor dureza.

Además el enfriamiento debe ser tan rápido como sea posible sin provocar que las paredes del artículo se separen del molde debido al vacío provocado en el interior, causando la aparición de deformaciones. La rotación uniforme en ésta etapa del proceso es tan importante como durante el calentamiento, pues garantiza la existencia de tensiones internas, alabeo o deformaciones mínimas en los artículos. La etapa de enfriamiento es muy importante debido a que según las características químicas que posee el polímero se producen efectos sobre las propiedades físicas del producto, siendo este efecto nulo si se utilizan polímeros amorfos, y dando especial cuidado al uso de polímeros cristalinos ya que se debe producir la menor distorsión en los cristales.

4.- Cuando la pieza se ha solidificado y enfriado hasta una temperatura a la cual sea manipulable por lo general es a los 40°C, se procede a sacarla del molde y se puede iniciar una nueva producción. Ésta última etapa, aparentemente muy sencilla, puede llegar a requerir métodos de alta tecnología cuando las piezas fabricadas tienen diseños intrincados o son de gran tamaño



**ILUSTRACIÓN 3 PROCESO DE ROTOMOLDEO**

La ilustración 3 nos proporciona una vista más exacta de lo que el proceso significa.

Es necesario comprender que el rotomoldeo no hace uso de la fuerza centrífuga que lanzaría el material hacia las paredes del molde, ya que las velocidades de rotación son relativamente bajas, y el polímero comienza a mezclarse de manera regular, como ya se mencionó adhiriéndose a la pared del molde, por otro lado la relación de velocidad entre la rotación de los ejes se ha comprobado de manera experimental que es de 4:1 entre el eje mayor y menor, ya que esta relación permite la formación de una capa de espesor uniforme en la mayor parte de las formas moldeadas.

En muchos casos el molde requiere de un proceso extra que se le hace llamar curado del molde en el cual se le hace llegar a temperaturas de 230°C para que de este modo el desmoldante que es agregado para la fácil extracción del tinaco del molde

### **Ventajas y desventajas del proceso de rotomoldeo**

El proceso de rotomoldeo es relativamente nuevo ya que la principal limitación para su desarrollo fue la falta de materiales adecuados. Sin embargo, con el desarrollo de nuevos materiales, la fabricación de moldes especiales, la invención de equipos adecuados e investigación, permitieron un rápido avance. Hoy en día y con ayuda de las computadoras, se puede simular el proceso de transformación del material dentro del molde y la transferencia de calor involucrada con el objetivo de pronosticar posibles dificultades y optimizar el proceso. Además, hay una gama de instrumentos para medir temperaturas sin que estos entren en contacto con el molde, lo que permite hacer mediciones dentro y fuera de este último. En la mayoría de los casos, estos instrumentos forman partes de paquetes especiales que permiten obtener gráficas de temperaturas en función del tiempo; con lo cual se puede determinar con bastante exactitud las temperaturas que marcan la transición de los estados del material. Debido a todos estos avances y sus características particulares, el proceso presenta una serie de ventajas que son:

El producto final está libre de esfuerzos residuales.

- Hay ahorro significativo de material ya que las piezas son huecas.
- Si se desea reducir el espesor de un producto, no hay necesidad de mecanizar.
- El espesor podrá reducirse disminuyendo la cantidad de material.
- No hay pérdidas de material ya que todo queda depositado en la pieza.
- Se pueden producir de piezas de gran volumen.
- Los artículos pueden tener múltiples capas del mismo u otro material.
- Se pueden tener piezas de gran calidad y detalles debido el material puede fluir hasta en zonas muy angostas.
- Moldes de varias piezas pueden producir productos sin dejar marcas.
- Se pueden moldear productos completamente diferentes en un mismo equipo.
- Sin embargo, el proceso también tiene limitaciones que deben superarse.

Las desventajas más importantes son:

- El acabado superficial puede resultar pobre como consecuencia de la alta porosidad. Además, un alto contenido de burbujas dentro del producto implica malas propiedades mecánicas.
- La eliminación completa de las burbujas implica largos tiempos de calentamiento y esto podría degradar el material si no se hace con cuidado.
- No se aprovecha correctamente la energía porque los moldes deben calentarse hasta altas temperaturas, enfriarse hasta una temperatura adecuada para el desmolde y volverse a calentar nuevamente. Esto normalmente se hace por convección forzada de aire dentro de un horno, lo que resulta en un mal aprovechamiento del calor.
- El costo de los materiales es relativamente alto porque al ser adquiridos en forma de grana deben someterse a un proceso de molienda.
- En la actualidad, los materiales usados todavía son limitados en contraste con otros procesos.
- Las etapas de carga y descarga requieren mucha mano de obra y podrían resultar costosas.

Todas las desventajas presentan aspectos importantes para la ingeniería y son los aspectos en los que se deben trabajar para optimizar el proceso.

### **Materiales de rotomoldeo**

El proceso de rotomoldeo usa exclusivamente polímeros para la producción de cualquier producto. Estos pueden estar en estado sólido o líquido dependiendo de la aplicación en la que se va a usar. En la industria del rotomoldeo, 80% de los materiales son del tipo termoplásticos, mientras que el otro 20% son termoestables.

De los termoplásticos, el polietileno es el más usado y su participación representa el 85% del mercado mundial. El PVC-Plastisol representa el 12% y en el 3% restante están se reparte entre ABS, nylon, polipropileno, poliéster insaturado, poliestireno, poliuretanos y siliconas. Debido a que el objetivo principal del trabajo es diseñar un sistema de rotación para la fabricación de juguetes, se destacará al PVC-Plastisol como el más importante porque se usa como materia prima para la producción de las partes de muñecas. Sin embargo, debido a que el PVC ha sido atacado fuertemente por organizaciones medioambientales por los plastificantes con los que se mezcla, se pensar en materiales alternativos. Debe resaltarse que el plastificante que se usa (DOP) que no es uno de los que se han prohibido para la fabricación de juguetes.

### **Características generales de los polímeros**

Los polímeros son macromoléculas constituidas por la unión de moléculas más pequeñas denominadas monómeros. Los monómeros están unidos unos a otros a través de enlaces fuertes o covalentes, mientras que las macromoléculas se unen unas a otras mediante enlaces débiles como puentes de hidrogeno. Estos enlaces débiles hacen que no sean tan resistentes como los metales y pero sí bastante elásticos bajo determinadas condiciones. Los polímeros exhiben dos temperaturas características que marcan los cambios relevantes en las propiedades. La primera es la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) que es común en todos los polímeros y se define como la temperatura bajo la cual el material se comporta como un cerámico (rígido y quebradizo) y sobre la cual el polímero es dúctil y flexible. La segunda temperatura es la temperatura de fusión ( $T_m$ ) que sólo se presenta en los polímeros cristalinos y que se define como la temperatura a la cual el polímero pasa del estado sólido al líquido. Los polímeros también pueden clasificarse en función del cambio de su comportamiento frente a diversas temperaturas como termoplástico y termoestable. Los polímeros termoplásticos son aquellos que exhiben cambios en sus propiedades físicas según la temperatura a los que están sometidos. Un polímero termoplástico puede ser amorfo o cristalino. Un polímero amorfo es un polímero que solo presenta  $T_g$  y tiene una estructura desordenada. Esto significa que las macromoléculas están unas encima de otras y/o enredadas. En contraste, un polímero cristalino es aquel que presenta estructura ordenada porque las macromoléculas tienden a arrollarse en forma de hélices que se alinean unas con otras dando un aspecto de orden. Los polímeros cristalinos se caracterizan por tener  $T_g$  y  $T_m$  por lo que si se calientan sobre la  $T_g$ , conservan sus propiedades mecánicas y las macromoléculas empiezan a adquirir movimiento cuando están la  $T_m$ . Dado que no existen polímeros de estructura totalmente cristalina, pero sí de estructura casi amorfa, un polímero cristalino es, en realidad, un polímero semicristalino. Un polímero semicristalino se caracteriza por presentar una fase amorfa y otra cristalina.

Dependiendo de la proporción en que se encuentre una u otra fase, el polímero podrá ser tratado como cristalino o amorfo. La cantidad de fase cristalina y amorfa que conforman un material se especifica con el grado de cristalinidad y normalmente se expresa en porcentaje. Por ejemplo, el PVC puede ser tratado como amorfo por su baja porcentaje de cristalinidad, mientras que el polietileno debe ser tratado como cristalino. El grado de cristalinidad es un buen indicador de las propiedades mecánicas de un polímero. Un polímero con mucha fase cristalina exhibe mejor resistencia que uno con mucha fase amorfa, pero este último es más resistente al impacto. Similarmente, un polímero con mucha fase cristalina es más estable a altas temperaturas que uno amorfo. La tabla 1 muestra el grado de cristalinidad de algunos polímeros termoestables y sus temperaturas características. Por otro lado, un polímero termoestable se caracteriza por presentar sólo fase amorfa y por tanto sólo tiene temperatura de transición vítrea. Se

compara siempre con un "huevo duro" ya que una vez que esta cocido no puede suavizarse y lo único que se logra al calentarlo es degradarlo. Si se enfría bajo su  $T_g$  se pone frágil y quebradizo.

Los polímeros termoestables no pueden reciclarse por medios convencionales porque al calentarse muy por encima de su  $T_g$  se degradan. No pueden fundirse al igual que los termoestables porque no presenta  $T_m$ .

*Características de algunos polímeros termoplásticos [Oxford University Press, 1999]*

Material	Cristalinidad (%)	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	Referencia
Polietileno de baja densidad (LDPE)	29 – 40	-118	110	[p.522]
Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	33 – 53	–	123	[p.508]
Polietileno de alta densidad (HDPE)	35 – 90	-116	145	[p.493]
Policloruro de vinil (PVC)	12 – 18	85	261	[p.928]

**TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS POLÍMEROS**

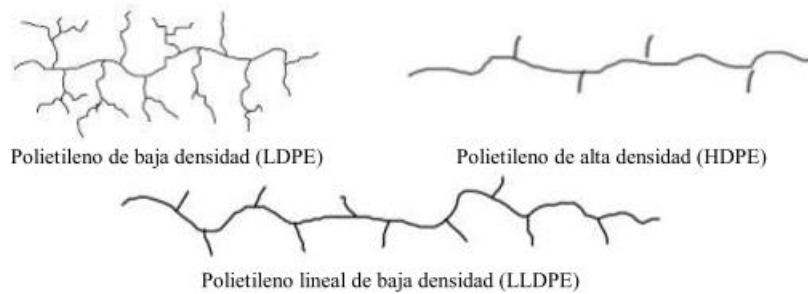
Debido a que el objetivo del trabajo está relacionado con la producción de artículos termoplásticos, la siguiente sección se enfoca en describir las características principales de las resinas usadas en el proceso de rotomoldeo.

### **Polietileno (PE)**

El polietileno se obtiene de la polimerización del etileno. Es el polímero termoplástico más usado en la industria del rotomoldeo por su bajo costo y su resistencia al agua, aceites, sustancias alcalinas y ácidos de todo tipo a temperatura ambiente. Es reciclaje en su totalidad y con las precauciones adecuadas se puede volver a pulverizar y moldear. Está en estado sólido como polvo o gránulos, siendo el tamaño promedio desde 150 hasta 500  $\mu\text{m}$ .

En general, propiedades como rigidez, contracción, resistencia a la corrosión y dureza crece conforme la densidad aumenta. En cambio, la resistencia al impacto y al cracking decrece conforme la densidad aumenta. Las diferencias entre el polietileno de alta densidad y el de baja densidad tienen que ver con la forma de las macromoléculas. El polietileno de baja densidad (LDPE) tiene macromoléculas con grandes ramas, lo que le confiere buena flexibilidad y resistencia al cracking. Debido a que las ramas son largas, estas no se aglomeran unas con otras disminuyendo las fuerzas de atracción y la densidad debido a que en un mismo volumen hay menos macromoléculas. Por el contrario, el polietileno de alta densidad (HDPE) se caracteriza por tener cadenas poliméricas con ramas muy cortas, haciéndolo un material rígido y fuerte porque las fuerzas de atracción entre macromoléculas es mayor, pero de baja resistencia al impacto y a las bajas temperaturas. Como las ramas son cortas, las macromoléculas están más compactas y por tanto la densidad tiende a ser mayor. La dureza de estos polímeros es superior a los de baja densidad al igual que su resistencia al cracking (hasta 100 veces mayor). Finalmente, el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) se caracteriza porque las macromoléculas tienen ramas ligeramente más largas que uno de alta densidad y en mayor número. Este tipo de ramas mejora la resistencia y dureza del material en relación con el polímero de baja densidad a la vez que se conserva la resistencia a bajas temperaturas. La ilustración 2 muestra la diferencia entre las macromoléculas de los diferentes tipos de polietileno.





#### ILUSTRACIÓN 4 MACROMOLÉCULAS DE LOS TIPOS DE POLÍMERO

El polímero que se emplea en la planta designada para este diseño es un HDPE con las siguientes propiedades

**TABLA 2 PROPIEDADES DEL HDPE**

<i>propiedades del polímero</i>	<i>valores</i>	<i>unidad</i>
material	HPDE	
densidad	937	kg/m <sup>3</sup>
masa	11	kg
temperatura de fundición	200	°c
h polímero	669000	j/kg

#### Moldes

Los moldes son elementos huecos de una o varias piezas y de buenas propiedades térmicas y resistencia al calor. El espesor de los moldes es pequeño en comparación con otros procesos de fabricación ya que en el rotomoldeo la presión de trabajo es cercana a la ambiental. Los materiales más comunes para la fabricación de moldes son acero, níquel, aluminio y cobre; aunque para aplicaciones especiales se usan moldes de materiales termoestables o de fibra de vidrio. El material adecuado para la fabricación del molde depende de la complejidad de la pieza. Por ejemplo, para la fabricación de tanques de almacenamiento es común usar moldes de acero rolado, pero para moldes de mucha complejidad (rostros) se prefiere usar níquel o cobre electroformado o fundición de aluminio. Indistintamente del material, un molde deben tener las siguientes características básicas:

- El molde debe estar hecho de un material de buena conductividad térmica para favorecer la transferencia de calor entre el portador de energía, el molde y el material.
- El molde debe tener la suficiente resistencia mecánica para no deformarse a pesar de las altas temperaturas del proceso, ya sea durante el enfriamiento o el calentamiento.
- El molde debe tener un respiradero libre de material para que el interior siempre esté a presión atmosférica (o cerca a esta). Si el molde no tiene respiradero, el aire encerrado dentro del molde aumentara su presión como resultado del calentamiento y el molde podría deformarse. Durante el enfriamiento, la disminución de la temperatura hará que la presión del aire disminuya más allá de la presión atmosférica y debido la diferencia de presiones, actuará una fuerza neta sobre el molde que podría deformarlo.
- Los moldes deben tener ángulos de salida apropiados para el desmolde y debe considerarse el encogimiento de los materiales durante el enfriamiento Si un molde consta de dos o más partes, el sistema que cierre debe permitir cerrarlos fuertemente y abrirlos con facilidad.

Una comparación entre las propiedades térmicas de los materiales más usados para la fabricación de moldes se puede ver en la tabla 3. Se observa de la tabla que el aluminio es el más fácil de mecanizar y comparado con el níquel o el inoxidable presenta mejores propiedades térmicas. Pero la cantidad de energía requerida para calentarla es mayor en comparación con la de los demás si nos referimos a que trabajaremos con moldes grandes.

**TABLA 3 PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS MATERIALES PARA MOLDES**

<i>Material</i>	<i>Densidad Kg/m<sup>3</sup></i>	<i>Coefficiente de conductividad térmica W/mK</i>	<i>Calor específico J/kgK</i>	<i>Coefficiente de dilatación térmica(*10<sup>6</sup>) K<sup>-1</sup></i>
Aluminio	2800	147	917	23
Cobre	8960	400	385	12
Níquel	8830	22	419	14
Acero inox.	7800	26.1	490	16

Por lo que la mejor opción para moldes de gran tamaño es el acero inoxidable por sus propiedades térmicas.

### **Equipos de rotomoldeo**

Si bien es difícil generalizar los equipos de rotomoldeo debido a que el volumen de las piezas puede variar desde los 0,05 litros hasta los 10 000 litros, hay ciertas características con las que todos los equipos deben cumplir. Estas características están ligadas a funciones como cargar, girar, calentar y enfriar pues son las etapas del proceso de rotomoldeo. En la actualidad, la industria dispone de equipos que permiten cumplir estas funciones básicas y algunos de ellos se describirán a continuación.

#### **Equipo de rotomoldeo tipo carrusel**

Es uno de los equipos más usados en la industria del rotomoldeo. Fue diseñado para la producción de artículos de tamaño mediano y moderado en serie. La ventaja principal de este tipo de equipos es que se pueden trabajar con varios moldes a la vez. Mientras un molde se encuentra en la zona de calentamiento, otro está en la zona de enfriamiento y un tercero está en la zona de carga y descarga. Los primeros equipos tenían tres brazos fijos (separados 120°) que se montaban sobre una torreta que al girar los llevaba junto con los moldes a una estación diferente. La desventaja principal era que todos los brazos debían girar al mismo tiempo para pasar a la siguiente estación por lo que el tiempo de giro estaba restringido al proceso más lento. Debido a que el proceso de enfriamiento es el más lento, se insertó un brazo más a la torre, así mientras un brazo se enfriaba dentro de la cámara, otro lo hacía fuera de esta, otro se calentaba y el otro se cargaba o descargaba. Además del uso de un brazo adicional, los brazos también se hicieron independientes. De esta manera la necesidad de ceñirse al proceso más lento desapareció. Aunque un brazo no pueda adelantar a otro, si el material cumplió su ciclo de calentamiento y la zona de enfriamiento está ocupada, puede esperar fuera del horno e ir enfriándose a temperatura ambiente hasta que el brazo que lo adelanta se mueva hacia la zona de carga. Con brazos independientes es posible buscar una secuencia adecuada para que el equipo esté siempre ocupado e inclusive pueda rotomoldear artículos diferentes.

La situación mejora aún más si en vez de tener varios brazos, se tienen varias estaciones o zonas de calentamiento, enfriamiento o carga. Entonces, el operario designará la estación vacía como una auxiliar y según convenga. La desventaja de esta clase de equipos es que necesitan de mucho espacio. La ilustración 3 muestra un equipo tipo carrusel de cuatro estaciones independientes de la marca italiana Caccia.



**ILUSTRACIÓN 5 EQUIPO TIPO CARRUSEL MARCA CACCIA**

**Equipo de rotomoldeo de desplazamiento lineal o tipo shuttle**

Este equipo se diseñó con el objetivo de reducir el espacio ocupado por los equipo tipo carrusel. Tienen dos configuraciones particulares; en la primera configuración, la cámara de calentamiento sólo tiene un acceso. El molde con su contenido se sujetan en el brazo y se llevan hacia la cámara de calentamiento. Al finalizar el calentamiento, se retira el brazo y se enfría el producto en la parte exterior de la cámara con la ayuda ventiladores. En este caso, la zona de carga y descarga sirve también como zona de enfriamiento. En la segunda configuración, la cámara de calentamiento tiene dos entradas y en cada entrada se sitúa un brazo. Cuando la etapa de calentamiento ha culminado, se retira el brazo para enfriar el molde y por el otro extremo se introduce el segundo brazo con material fresco. Un equipo de este tipo presenta mayor eficiencia que uno convencional porque la cámara de calentamiento siempre está ocupada por cualquiera de los dos brazos y no hay tiempos muertos.

La ilustración 4 muestra un equipo de la marca brasilera Rotoline con dos entradas. Dado que el operación puede programar la secuencia de rotomoldeo, esta clase de equipos son más versátiles que un equipo tipo carrusel de brazos fijos.



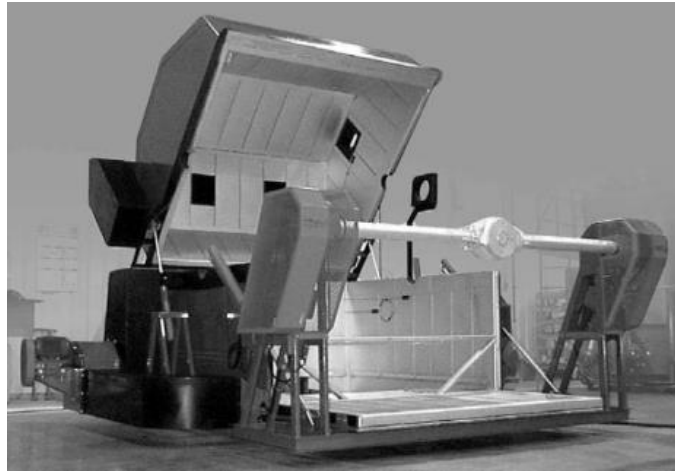
**ILUSTRACIÓN 6 EQUIPO TIPO SHUTTLE**

**Equipo de rotomoldeo tipo almeja o clamshell**

Se caracteriza porque la cámara de calentamiento se abre y cierra como una almeja.

Al igual que los otros equipos la carga, descarga se hace fuera de la cámara de calentamiento. El brazo de giro entra junto con los moldes a una cámara que sirve para los procesos de

calentamiento y enfriamiento es un poco particular y puede verse en la ilustración 5 que muestra un equipo de la marca estadounidense Ferry.



**ILUSTRACIÓN 7 EQUIPO TIPO ALMEJA MARCA FERRY**

#### **Equipo de rotomoldeo tipo rock-and-roll**

Los equipos rock and roll giran el molde y su contenido de forma oscilante. El giro principal se hace alrededor del eje longitudinal del molde en un solo sentido; a este movimiento se le conoce como roll. El giro secundario se le denomina rock y el molde gira alternadamente alrededor de un eje perpendicular un ángulo de  $\pm 45^\circ$ . Los equipos de este tipo son muy usados para la fabricación de tanques y reservorios. Sin embargo, también se usan para fabricar artículos que asimétricos como cayacs, depósitos de basura y botes pequeños. La forma en que se calientan los moldes también es un tanto especial ya que los primeros equipos que se fabricaron, aplicaban la llama directamente al molde. Sin embargo, nuevas configuraciones usan cámaras cerradas de calentamiento (cámaras rock) que pueden girar alternadamente y la transferencia de energía se hace con aire forzado; este tipo de cámaras se usa preferentemente para artículos asimétricos. En cuanto al enfriamiento, este se hace fuera de zona la de calentamiento para cámaras tipo rock y para equipos de llama abierta se hace en el mismo lugar. La ilustración 6 muestra un equipo rock and roll con cámara de calentamiento trabajando de la marca brasilera Rotoline.

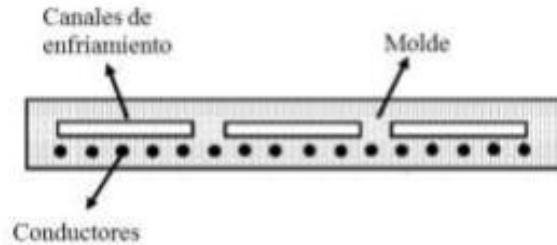


**ILUSTRACIÓN 8 EQUIPO TIPO ROCK AND ROLL MARCA ROTOLINE**

### Equipo de rotomoldeo con calentamiento directo

#### Equipo de rotomoldeo con calentamiento por resistencias

Este tipo de equipos usa energía eléctrica para calentar el molde. El sistema consiste en una red de conductores muy finos incrustados en un molde no metálico como se muestra en la ilustración 7.



**ILUSTRACIÓN 9 ESQUEMA DE MOLDE CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO**

El material usado es un compuesto de resinas termoestables y aditivos que tiene buenas propiedades mecánicas y térmicas. La desventaja es que no es muy fácil adaptar los moldes y los tiempos de fabricación son largos debido a que todo el proceso es realizado por el mismo equipo y en el mismo lugar. Por otro lado, los moldes cuentan con canales adicionales por donde pasa el fluido de enfriamiento. Primero ocurre el calentamiento del material por intercambio de energía entre los finos conductores y el molde y un instante después el enfriamiento por intercambio de energía entre el fluido que pasa por canales contiguos y el producto terminado. La gran ventaja esta nueva tecnología es el ahorro significativo de la energía. Mientras con un equipo convencional sólo del 10 al 40% de la energía invertida es usada, con el calentamiento por resistencias se logra aprovechar hasta el 80% de la energía usada. La ilustración 8 muestra un equipo de calentamiento por resistencias de marca italiana Leonardo en donde todas las etapas del proceso ocurren en el mismo lugar



**ILUSTRACIÓN 10 EQUIPO DE ROTOMOLDEO AUTOMATIZADO MARCA LEONARDO**

#### Sistema de calentamiento con aceite térmico

La transferencia de calor es mucho más eficiente cuando se usa como portador de energía a un líquido como el aceite en vez de un gas como el aire y esto se debe a que un líquido tiene mejores propiedades térmicas que un gas. Se han hecho intentos para fabricar equipos que usen chaquetas de aceite (por donde circulara el aceite previamente calentado) incrustadas en la superficie exterior del molde, pero el inconveniente es que siempre hay fugas de aceite y olores desagradables que se adhieren al producto. Debido a estas dificultades, sólo se usan en aplicaciones pequeñas y equipos de laboratorio. Sin embargo, la principal ventaja que presentan

es que como no necesitan cámara de calentamiento, los instrumentos de control y medición pueden estar cerca del molde sin tener que preocuparse de si son o no afectados por la temperatura de la cámara.

El desarrollo de la tecnología ha permitido eliminar esas limitantes como lo es el procedimiento y dispositivo para rotomoldeo donde el calentamiento/enfriamiento de los moldes se lleva a cabo mediante circulación de fluido térmico a través de una cámara con geometría paralela a la superficie de los moldes

La presente invención hace referencia a un procedimiento y un dispositivo para rotomoldeo de piezas donde el calentamiento/enfriamiento de los moldes se lleva a cabo mediante la circulación de fluido térmico que fluye en el interior de una cavidad con la misma geometría y paralela al molde electroconformado.

También se conocen sistemas de calentamiento directo con aceite pero donde el fluido circula por canales construidos alrededor de la cavidad bien mediante mecanizado o bien mediante fundición. El proceso de calentamiento/enfriamiento en este último caso no es uniforme y además el molde tiene un espesor de pared considerablemente mayor que el propuesto.

Las ventajas que se derivan de la utilización del procedimiento y dispositivo para rotomoldeo

- Uniformidad del calentamiento/enfriamiento en toda la superficie de la pieza.
- Menor espesor de pared para el molde.
- Permite la estandarización del portacáscaras de tal manera que se puede aprovechar la misma porta moldes para diferentes geometrías dependiendo del tamaño de las mismas.

Una Máquina automática de rotomoldeo La máquina de moldeo Leonardo, desarrollada por la compañía italiana Pérsico y comercializada por Ferry Industries en Norte América, se destaca por estar completamente automatizada: abre el molde, carga la resina, remueve las piezas, todo sin necesidad de un operador. La máquina es particularmente interesante, pues no tiene un horno ni una estación de enfriamiento, sino que el molde se calienta y se enfría a través de intercambiadores de calor instalados en la pared del molde. Como fluido de intercambio se usa aceite, que se hace pasar por estos canales. El calentamiento, de esta forma, puede localizarse en regiones específicas del molde, donde se puede introducir o remover más calor que en otras zonas. El cierre y apertura del molde se lleva a cabo con cilindros neumáticos, por lo que la labor de atornillar y desatornillar pernos manualmente se elimina. Y la pieza se expulsa automáticamente del molde, mientras que a través de una tolva se dosifica la resina para el siguiente ciclo. La máquina también cuenta con venteo automatizado del molde, con lo que se controla el enfriamiento interno. La máquina ha sido preferida porque ayuda a entregar mejores tolerancias y mejor reproducibilidad, al igual que más homogeneidad en el espesor de pared, menores tasas de rechazo y menores costos de mano de obra y tiempos de parada. El consumo de energía también sería menor, aunque la inversión inicial en la máquina es, por supuesto, más alta que la de otras tecnologías. Otra desventaja sería que sólo puede moldearse un producto a la vez en la máquina.

### **Sistema de líquido térmico**

Un sistema de calentamiento por líquido térmico, para su mejor entendimiento, tiene un comportamiento similar al del cuerpo humano.

El serpiente multitubular de transferencia de calor es similar a las venas y arterias de nuestro cuerpo. La bomba recirculadora de líquido térmico es el corazón.

El líquido térmico vendría siendo nuestra sangre. El quemador del calentador junto con su ventilador equivale al sistema digestivo y respiratorio del cuerpo.

El aceite térmico es un fluido caloportador cuyo uso es generalizado en el sector industrial como medio de transporte de calor para distintos tipos de procesos. Existen multitud de tipos de aceites térmicos cuya selección se realiza en función de los parámetros de operación a los que debe ser expuesto, principalmente la temperatura

Requiere de los siguientes componentes como mínimo el calentador de aceite térmico, la bomba y las válvulas especiales para aceite térmico, los usuarios de calor (intercambiadores de calor) y un tanque de expansión. El sistema de aceite térmico trabaja en circuito cerrado, con temperaturas altas. El quemador del calentador controla la temperatura (resistencias eléctricas cumplen con la misma función si fuera eléctrica) a través de la temperatura de salida del mismo (mientras que la temperatura de entrada varía).

Ventajas del aceite térmico:

Altas temperaturas (250 a 350°C) con presiones bajas, lo que nos trae altas capacidades de producción.

Elimina: el tratamiento de agua el mantenimiento a trampas de vapor la línea de condensados (corrosión)

Desventajas del aceite térmico:

Una capacidad de calor muy alta en movimiento, que requiere de bombas recirculadoras y válvulas especiales, así como un alto grado de aislamiento térmico. Degradación con el tiempo del aceite térmico. No deben existir por ningún motivo fugas de aceite térmico. Peligro de fuego, contaminación y envenenamiento. Costo alto del aceite térmico.

Control excesivo necesario del aceite térmico (degradación).

### **Propiedades y limitaciones del aceite térmico.**

Existen diversos tipos y fabricantes de aceites térmicos para bajas temperaturas (250°C), medias (310°C) y altas temperaturas (360°C).

La selección correcta, se debe hacer de acuerdo a la temperatura máxima del film y no de acuerdo a la temperatura promedio.

Un calentador multitubular, reparte sus cargas en un múltiplo de tubos en paralelo en forma uniforme. Su temperatura máxima del film, es menor a la de un calentador de uno o dos tubos en paralelo. Al acercarse la temperatura máxima recomendada por el fabricante, a la temperatura máxima del film se degrada el aceite térmico, perdiendo su vida, carbonizándose y tapando a los tubos del calentador. Por lo anterior, un calentador de aceite térmico, requiere del control semestral del estado del aceite térmico. Cualquier aumento de caída de presión a través del mismo, nos indica el comienzo de la degradación del aceite térmico y por lo consiguiente de una posible carbonización o incrustación del mismo.

Un sistema de calentamiento, por medio de un circuito cerrado de aceite térmico, requiere de un control de operación estricto y una selección de materiales completamente técnico profesional. Sus componentes interactúan entre sí, por lo que la falla de alguno, perjudica al sistema completo.

El circuito cerrado se compone de:

1. Calentador de aceite térmico.
2. Bomba recirculadora de aceite térmico.
3. Control de flujo de aceite térmico.

4. Tanque de expansión de aceite térmico.
5. Aceite térmico.
6. Usuario final o consumidor de energía final.

1.- Calentador de aceite térmico, multitubular de alta eficiencia. Como su nombre lo dice, es un calentador, por el cual debe circular constantemente el aceite térmico. El fabricante especifica el flujo mínimo requerido a través del calentador. Especifica adicionalmente el que se debe instalar un control de flujo, que debe indicar el flujo (medidor de flujo) y que debe tener un switch de control, para mandar apagar al calentador por falta del flujo requerido. Sin el control de flujo no se debe operar al calentador de aceite ya que, este debe apagar de inmediato por una falla de flujo de aceite térmico.

Una vez instalada la bomba recirculadora de aceite térmico y operando al calentador a la temperatura de salida requerida, se debe llevar un control estricto y diario de la caída de presión a través del calentador de aceite térmico. El operador deberá tomar lectura del manómetro de entrada y del manómetro de salida. El diferencial entre ambos, es la caída de presión a través del calentador en condiciones normales de operación. (Calentador nuevo, sin ningún tipo de incrustación, con aceite térmico nuevo sin degradación). Esta cifra ( $\Delta p$  diferencial), es la cifra más importante, a ser checada diario e inscrita en bitácora por el operador, del calentador de aceite térmico. La caída de presión a través del calentador (diferencial de presiones) debe ser siempre la misma. Si empieza a crecer nos indica, que se están formando incrustaciones dentro de los tubos del calentador y que por lo tanto el líquido térmico ha perdido sus cualidades originales y debe ser cambiado de inmediato. Cualquier aumento en esta cifra diferencial de presiones, nos debe alarmar ya que el calentador entra en peligro de acortar súbitamente su vida útil. (El material de los tubos que forman al calentador, debe estar constantemente enfriado por un flujo mínimo de aceite térmico. Si alguno de los tubos se llega a incrustar, dejará pasar menos flujo de enfriamiento de aceite térmico. Por falta de flujo de enfriamiento, la incrustación crecerá rápidamente, el material del tubo (acero) se recalentará, cambiando de color, hasta ponerse al rojo vivo, poco antes de su ruptura. La cifra de caída de presión a través del calentador, debido a las incrustaciones, crecerá rápidamente indicándonos el peligro de la operación con este calentador incrustado.

2.- La bomba recirculadora de aceite térmico, debe ser fabricada especialmente para este uso. Cualquier tipo de falla, cortará al flujo requerido de aceite térmico, o disminuirá el flujo requerido mínimo a través del calentador.

3.- El control de flujo, que es a la vez un medidor con control (señal de apagado) bajo un flujo mínimo, protegerá la vida del calentador, detectando cualquier tipo de falla de la bomba recirculadora de aceite térmico.

4.- El tanque de expansión, absorbe la expansión del volumen de aceite térmico en recirculación, al aumentar su temperatura.

A su vez un control de nivel en el mismo, con una señal de alarma por bajo nivel, nos indicaría cualquier fuga de aceite térmico, que esté rompiendo la condición elemental de circuito cerrado de aceite térmico.

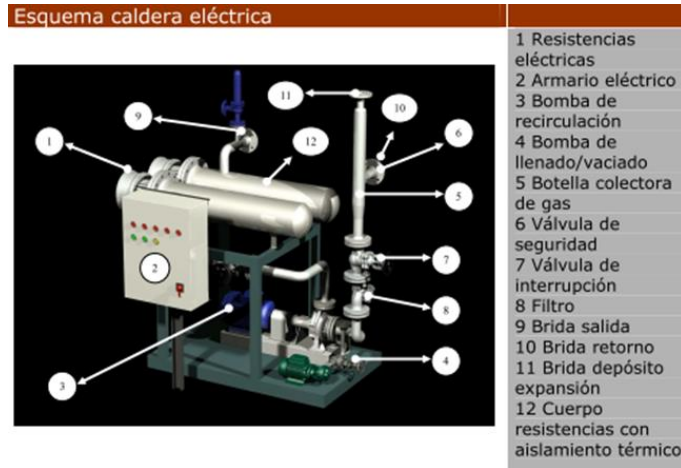
5.- Por último, tenemos al aceite térmico, su selección y los cuidados necesarios requeridos para poder utilizarlo en forma confiable.



## Tipos de calentadores Eléctricos

La fuente de calor son resistencias eléctricas distribuidas dentro del Cuerpo del calentador. El cuerpo o cámara de presión de estos calentadores está formada por un cilindro de acero con sus respectivas tapaderas.

La ilustración 9 muestra un calentador de fluido térmico con sus principales elementos.



**ILUSTRACIÓN 11 ESQUEMA CALDERA ELÉCTRICA**

**Modelos especiales para:**

- Control con PLC
- Calentamiento prensas
- Carga térmica reducida
- Ejecución antideflagrante
- Comunicación a PC
- Depósito expansión presurizado
- Temperatura de servicio hasta 400 °C
- Regulación potencia 0...100%
- Diseño ASME
- Agua caliente

**Características**

- Gama potencias entre 8kW y 2500kW
- Códigos de diseño: AD-MERKBLÄTTER, DIN4754, EN-13445
- Marcado CE
- Baja densidad: 3,15 W/m<sup>2</sup>
- Presión de prueba oficial: 14 bar
- Presión de servicio: 7 bar
- Temperatura de diseño: 400°C
- Temperatura máx. de servicio: 350°C
- Cabezal separado

**ILUSTRACIÓN 12 CARACTERÍSTICAS CALDERA ELÉCTRICA**

Modelo	Potencia calorífica	
	Kcal/h	kW
CE-24	20.500	24
CE-41	35.000	41
CE-48	41.000	48
CE-54	46.000	54
CE-81	69.500	81
CE-85	73.000	85
CE-96	82.500	96
CE-108	93.000	108
CE-120	103.000	120
CE-240	206.000	240
CE-360	300.000	350
...	...	...
CE-2500	2.150.000	2500

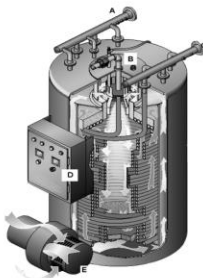
\*Otras potencias bajo pedido

**ILUSTRACIÓN 13 POTENCIAS CALENTADOR ELÉCTRICO**

### Con serpentín

Es el diseño de calentador más utilizado. La fuente de calor en estos calentadores son los hidrocarburos, pudiendo ser GLP, Gas Natural, Búnquer y Diésel.

En estos calentadores, el aceite circula adentro de un serpentín helicoidal colocado dentro del cuerpo del calentador. La llama fluye por el centro de este serpentín para chocar en el refractario ubicado en el fondo del calentador, para luego subir y hacer los 4 pasos de flujo de gases. La ilustración 12 muestra este proceso.



A: Entrada de Fluido Térmico  
B: Quemador  
C: Salida de Fluido Térmico  
D: Panel de Control Eléctrico  
E: Motor del Ventilador para la Combustión

### ILUSTRACIÓN 14 CALENTADOR DE FLUIDO TÉRMICO CON SERPENTÍN

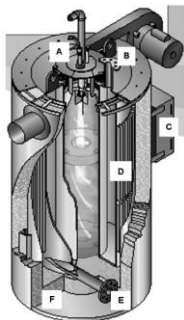
El calentador de serpentín puede ser horizontal o vertical. El horizontal es un equipo de 3 pasos y su eficiencia es alrededor de un 81%. Ocupa más espacio (huella de instalación más grande). El vertical es un equipo de 4 pasos y su eficiencia es alrededor de un 84%. Ocupa menos espacio (huella de instalación más pequeña). Los calentadores de serpentín son los calentadores más eficientes del mercado en la categoría de los que funcionan con hidrocarburos. Las capacidades de estos equipos alcanzan los 20, 000,000 Btu/h.

### Tipo vertical anular

La fuente de calor en estos calentadores son los hidrocarburos, pueden ser GLP, Gas Natural o Diésel.

El cuerpo o cámara de presión de estos calentadores está formada por dos cilindros de acero concéntricos de diferentes diámetros con sus respectivas tapaderas.

La llama del quemador circula por el centro de estos cilindros para chocar en el refractario ubicado en el fondo del calentador, para luego subir y hacer los 2 pasos de flujo de gases. La ilustración 13 muestra este proceso.



A: Quemador  
B: Salida de Fluido Térmico de Calor  
C: Panel de Control Eléctrico  
D: Aletas para Transferencia de Calor  
E: Entrada de Fluido Térmico  
F: Refractario de Alta Densidad

### ILUSTRACIÓN 15 CALENTADOR DE FLUIDO TÉRMICO VERTICAL DISEÑO ANULAR

Estos calentadores son de 2 pasos de flujo de gases por lo que no son muy eficientes. Su eficiencia ronda por un 79%. Así mismo, las capacidades son pequeñas, hasta 1, 740,000 Btu/h.

La caída de presión del aceite en estos calentadores es menor que en los de serpiente y son más económicos que los otros diseños.

### Líquidos Térmicos o Aceites

Existen en el mercado una serie de diferentes marcas de líquidos térmicos. Los líquidos térmicos fueron introducidos en el mercado en los años 1930. La composición de los líquidos térmicos está basada en mezclas eutécticas, óxidos de diphenyl, diphenyles, etc.

Los líquidos térmicos (aceites) tienen puntos de ebullición altos, y algunos de ellos, puntos de congelamiento a temperaturas relativamente altas. Sus usos prácticos se encuentran en la fase líquida en los rangos de 200°C hasta 300°C (algunos de ellos hasta 400°C).

A continuación enlistamos los líquidos térmicos más comúnmente usados en la industria:

**TABLA 4 TIPOS DE ACEITES TÉRMICOS**

MARCA	Temp. Máxima Recomendable (en film)		Rangos de Temperatura Recomendados por el fabricante de líquido térmico	
	°F	°C	°F	°C
Therminol 55°	675	357	hasta 600	315
Therminol 66	705	373	hasta 630	332
Therminol VP1	800	426	hasta 725	385
Dowtherm A	825	440	hasta 755	401
Dowtherm G-40	725	385	hasta 655	346
Dowtherm E	932	500	hasta 862	461
Mobiltherm 603	625	329	hasta 555	290
Marlotherm S	698	370	hasta 625	329

En base a la experiencia, en la práctica, el fabricante recomienda el uso de los siguientes líquidos térmicos:

**TABLA 5 TIPOS DE ACEITES RECOMENDADOS POR FABRICANTE**

Temperatura de salida (°C)	Líquido térmico	Fabricante
Hasta 225	Mobiltherm 603	MOBIL
Hasta 260	Therminol 55	MONSANTO
Hasta 310	Therminol 66	MONSANTO

Menor a 350	Therminol VP1	MONSANTO
Mayor a350	Dowtherm A	DOW CHEMICAL

**TABLA 6 PROPIEDADES DE THERMINOL**

Therminol	55
Densidad	810.3 Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	2.441 KJ/Kg * °c
Conductividad térmica	0.1327 W/m*k
Viscosidad cinemática	6.595 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
Numero de prandtl	98.31

Los aceites térmicos tienen una vida útil (aprox. 3 a 5 años). Normalmente, los que soportan una mayor temperatura son también los que tienen una mayor vida útil en condiciones normales. (Uno de ellos que se distingue por una vida útil larga es el Therminol 66 de Monsanto).

Se van degradando con el tiempo y uso. Cuando se degradan, pierden sus características originales, se carbonizan y se incrustan dentro de los tubos, poniendo en peligro la vida útil del calentador de aceite.

Es recomendable llevar a cabo un estricto control sobre la calidad de los mismos, sacando muestras del aceite en circulación constante (no del tanque de expansión) y mandándolas analizar semestralmente con el proveedor del mismo, para que nos indique el grado de pureza del mismo.

Con este control semestral del aceite térmico, se podrá uno percatar de la necesidad del cambio necesario de aceite térmico.

Cuando llega el momento de cambio, será necesario una limpieza total del sistema, eliminando cualquier rasgo de humedad (sopleteo con un gas inerte).

Recordemos que los aceites térmicos no son compatibles entre sí, por lo que no se deben mezclar.

Cualquier residual de carbonización o incrustación dentro del sistema debe ser eliminado cuidadosamente por medio de una limpieza química agresiva con recirculación con una bomba de acero inoxidable por parte de personal especializado y altamente calificado en este tipo de limpiezas.

### **Intercambiador de calor**

Un intercambiador de calor es un dispositivo construido para la transferencia de calor eficiente de un medio a otro que utiliza un fluido térmico. El medio puede ser separado por una pared sólida, de modo que nunca se mezclan, o pueden estar en contacto directo. Son ampliamente utilizados en la calefacción, refrigeración, aire acondicionado, plantas de energía, plantas químicas, plantas de petroquímica, petróleo refinerías, y procesamiento de gas natural.

El calentamiento por fluido térmico, es un tipo de calentamiento indirecto en el que se calienta un fluido de transferencia de calor de fase líquida y es bombeado hasta los usuarios de dicha energía térmica dentro de un circuito cerrado. Aceite térmico, glicol, y agua son medios comunes de transferencia térmica.

## Tipos de intercambiadores de calor

### Intercambiadores de serpentín sumergido

Consta de un tubo o ducto doblado en forma helicoidal, sumergido en un fluido el cual puede ser caliente o frío. Los intercambiadores de calor de serpentín se usan en casos en que no hay tiempo o dinero para adquirir un equipo comercial, ya que son fáciles de construir en un taller. Al ser fácilmente removibles y transportables se usan mucho para instalaciones provisorias. El rendimiento del intercambiador de calor es bueno y son fáciles de limpiar exteriormente. La limpieza interior generalmente no es problema, ya que la aplicación más frecuente es para calentamiento, generalmente con vapor. El vapor no ensucia pero es bastante corrosivo.

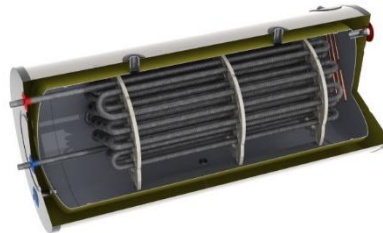


ILUSTRACIÓN 16 INTERCAMBIADOR DE SERPENTÍN SUMERGIDO

### Intercambiador de calor de tubo doble.

Los intercambiadores de tubo doble son los más abundantes. La causa de su generalización es su mayor flexibilidad. Consiste en un tubo pequeño que está dentro de otro tubo de mayor diámetro, circulando los fluidos en el interior del pequeño y entre ambos. Área de transferencia pequeña

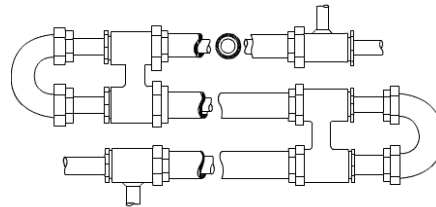


ILUSTRACIÓN 17 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO DOBLE

### Intercambiadores de calor de coraza y haz de tubos

Son los intercambiadores más ampliamente utilizados en la industria química y con las consideraciones de diseño mejor definidas. Consisten en una estructura de tubos pequeños colocados en el interior de un casco de mayor diámetro.

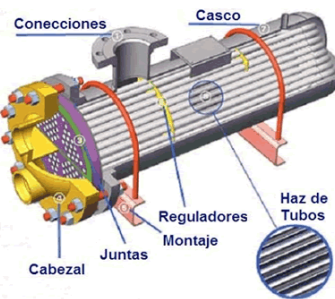


ILUSTRACIÓN 18 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y HAZ DE TUBOS

### Intercambiadores de cascada

Estos equipos consisten en bancos de tubos horizontales, dispuestos en un plano vertical, con agua que cae resbalando en forma de cortina sobre los tubos formando una película. Se pueden construir con tubos de cualquier tamaño pero con comúnmente de 2 a 4in de diámetro. Constituyen un método barato, fácil de improvisar pero de baja eficiencia para enfriar líquidos o gases con agua que puede estar sucia, o cualquier liquido frio.

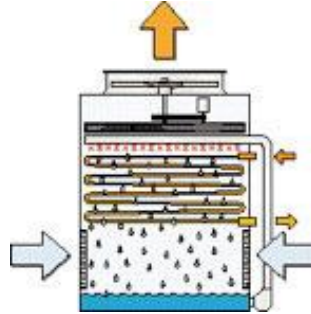


ILUSTRACIÓN 19 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CASCADA

### Intercambiador de calor de recipiente encamisado

Se denominó chaqueta al doble fondo o encamisado de un recipiente. El propósito de este equipo generalmente es calentar el contenido del recipiente sin que este se vea involucrado con el contenido del recipiente.



ILUSTRACIÓN 20 INTERCAMBIADOR DE CALOR ENCAMISADO

### Intercambiador de calor de placa

Un intercambiador de calor por placa consiste en una sucesión de láminas de metal armadas en un bastidor y conectadas de modo que entre la primera y la segunda circula un fluido, y la segunda y la tercera otro, y así sucesivamente. Se trata de equipos muy fáciles de desarmar para su limpieza. En la disposición más simple hay solo dos corrientes circulando, y su cálculo es relativamente sencillo.

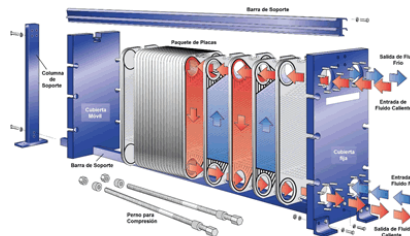


ILUSTRACIÓN 21 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACA

### Intercambiadores de calor de flujo cruzado

En este caso el fluido exterior es un gas (generalmente aire), mientras que el fluido interior puede ser un fluido cualquiera gas o líquido

Los fluidos se mueven en forma perpendicular entre sí, estos cambiadores de calor pueden ser tubulares con o sin aletas (placas), los fluidos pueden ser mezclados y sin mezclar.

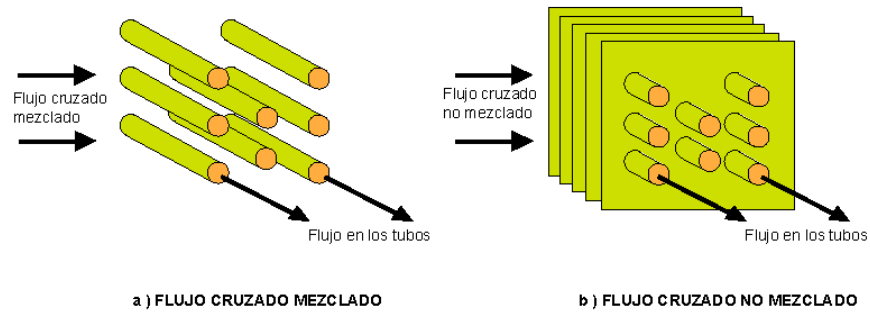


ILUSTRACIÓN 22 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO



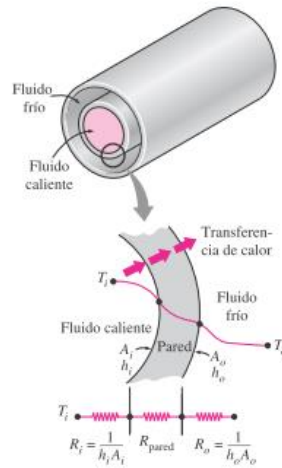
ILUSTRACIÓN 23 GEOMETRÍA DEL HAZ DE TUBO

En la industria nos encontramos con una gran variedad de radiadores para la transferencia de calor de cualquier magnitud pero con una geometría similar la cual puede ser variada a petición del cliente

### Coefficiente de transferencia de calor

Por lo común un intercambiador de calor está relacionado con dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida. En primer lugar, el calor se transfiere del fluido caliente hacia la pared por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección. Cualesquiera efectos de la radiación suelen incluirse en los coeficientes de transferencia de calor por convección.

La red de resistencias térmicas asociadas con este proceso de transferencia de calor comprende dos resistencias por convección y una por conducción, como se muestra en la ilustración 21 en este caso, los subíndices i y o representan las superficies inferiores y exteriores del tubo interior. Para un intercambiador de calor de tubo doble, la resistencia térmica de la pared del tubo es



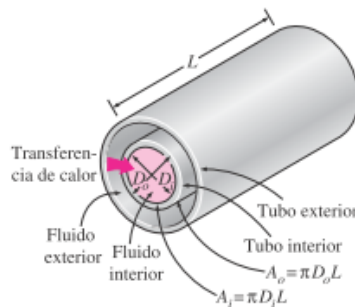
**ILUSTRACIÓN 24 RESISTENCIA TÉRMICA DE INTERCAMBIADOR DE TUBO DOBLE**

$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (1)$$

En donde  $k$  es la conductividad térmica del material de la pared y  $L$  es la longitud del tubo. Entonces la resistencia térmica total queda

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2)$$

$A_i$  es el área de la superficie interior de la pared que separa los fluidos y  $A_o$  es el área de la superficie exterior de esa misma pared. En otras palabras,  $A_i$  y  $A_o$  son las áreas superficiales de la pared de separación mojada por los fluidos interior y exterior, respectivamente cuando uno de los fluidos fluye adentro de un tubo circular el otro afuera de este, se tiene  $A_i = \pi D_i L$  y  $A_o = \pi D_o L$



**ILUSTRACIÓN 25 TUBO DOBLE**

En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente combinar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor del fluido caliente hacia el fluido frío en una sola resistencia  $R$  y expresar la razón de transferencia de calor entre los dos fluidos como



$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (3)$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor total, cuya unidad es  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , la cual es idéntica a la unidad del coeficiente de convección común, h cancelando  $\Delta T$ , la ecuación se convierte

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (4)$$

Se tienen dos coeficientes de transferencia de calor totales.  $U_i$  y  $U_o$ , para un intercambiador de calor. La razón es que todo intercambiador de calor tiene dos áreas superficiales para la transferencia de calor,  $A_i$  y  $A_o$ , las cuales, en general, no son iguales entre sí. Nótese que  $U_i A_i = U_o A_o$ , pero  $U_i \neq U_o$  a menos que  $A_i = A_o$ , por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor total U de intercambiador de calor no tiene significado a menos que se especifique el área sobre la cual se basa. En especial, este es el caso cuando uno de los lados de la pared del tubo tiene aletas y la otra no, ya que el área superficial del lado con aletas es varias veces mayor que la que no las tiene.

Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material del mismo es alta, como suele ser el caso, la resistencia térmica de dicho tubo es despreciable ( $R_{pared} \approx 0$ ) y la superficie interior y exterior del mismo son casi idénticas ( $A_i \approx A_o \approx A_s$ ). Entonces la ecuación para el coeficiente de transferencia de calor total se simplifica para quedar

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (5)$$

Donde  $U \approx U_i \approx U_o$ . Los coeficientes de transferencia de calor por separado, de adentro y de afuera del tubo,  $h_i$  y  $h_o$ , se determina aplicando las relaciones de la convección.

En la práctica los intercambiadores de calor son de uso común y un ingeniero se encuentra a menudo en la posición de seleccionar un intercambiador de calor que logre un cambio de temperatura específica de una corriente de fluido de gasto de masa conocido, o bien, de predecir las temperaturas de salida de las corrientes del fluido caliente y del frío en un intercambiador de calor específico.

Los intercambiadores de calor suelen operar durante largos periodos sin cambios en sus condiciones de operación, por lo tanto como aparatos de flujo estacionario. Como tales, gastos de masa de cada fluido permanece constante y las propiedades de los fluidos, como la temperatura y la velocidad, en cualquier entrada y salida, siguen siendo las mismas, asimismo, las corrientes de fluido experimental poco a ningún cambio en sus velocidades y elevaciones y, como consecuencia, los cambios en la energía cinemática y potencial son despreciables. En general, el calor específico de un fluido cambia con la temperatura; pero, en un intervalo específico de temperatura, se puede considerar constante en algún valor promedio, con poca pérdida de exactitud. La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede considerar despreciable. Por último, se supone que la superficie exterior del intercambiador de calor está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdidas de calor hacia el medio ambiente y cualquier transferencia de calor solo ocurre entre los dos fluido.

La razón de transferencia de calor se puede determinar de manera análoga a la ley de Newton del enfriamiento como

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_m \quad (6)$$

Donde  $u$  es el coeficiente total de transferencia de calor,  $A_s$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T_m$  es una apropiada diferencia promedio de temperatura entre los dos fluidos. En este caso, el área superficial  $A_s$  se puede determinar en forma precisa aplicando las dimensiones del intercambiador de calor. No obstante, en general, el coeficiente total de transferencia de calor  $U$ , y la diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre los fluidos caliente y frío pueden variar a lo largo del intercambiador de calor.

El calor promedio del coeficiente de transferencia de calor total se puede determinar, utilizando los coeficientes de convección promedio de cada fluido

### Mecanismos físicos de la convección

La transferencia de calor por convección es complicada por el hecho de que comprende movimiento del fluido así como conducción de calor. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido, iniciando índices más altos de conducción en un gran número de sitios. Por lo tanto, la velocidad de la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alto por convección que por conducción.

De hecho, entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de la transferencia de calor.

Para aclarar este punto todavía más, considere la transferencia de calor en estado estable a través de un fluido contenido entre dos placas paralelas que se mantienen a temperaturas diferentes, como se muestra en la ilustración

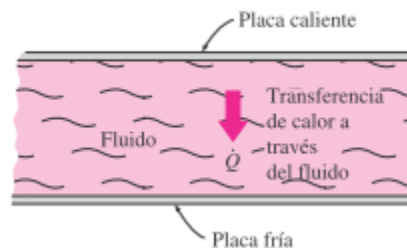


ILUSTRACIÓN 26 PLACAS PARALELAS

Las temperaturas del fluido y de la placa son las mismas en los puntos de contacto debido a la continuidad de la temperatura. Si se supone que no hay movimiento del fluido, la energía de las moléculas más calientes de este, cercanas a la placa caliente, se transferirá a las moléculas adyacentes más frías del mismo. Entonces esta energía pasa a la siguiente capa de la molécula más fría del fluido, y así sucesivamente hasta que, al final, se transfiere a la otra placa.

La experiencia muestra que la transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades viscosidad dinámica, conductividad térmica, densidad y calor específico del fluido, así como de la velocidad del fluido. También depende de la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida, además del tipo de flujo del fluido (el que sea turbulento o laminar). Por lo tanto, se espera que las relaciones de la transferencia de calor por convección sean un tanto complejas debido a su dependencia de tantas variables. Pero a pesar de la complejidad de la convección, se observa que la razón de transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de manera conveniente por la ley de Newton de enfriamiento como

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (8)$$

Donde

- $h$  = coeficiente e transferencia de calor por convección
- $A_s$  = área superficial de transferencia de calor
- $T_s$  = temperatura de la superficie
- $T_\infty$  = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie

A juzgar por sus unidades, el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura.

### Número de Nusselt

El Número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Así por ejemplo en transferencia de calor dentro de una cavidad por convección natural, cuando el número de Rayleigh es inferior a 1000 se considera que la transferencia de calor es únicamente por conducción y el número de Nusselt toma el valor de la unidad. En cambio para números de Rayleigh superiores, la transferencia de calor es una combinación de conducción y convección, y el número de Nusselt toma valores superiores

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} \quad (9)$$

Ambas transferencias se consideran en la dirección perpendicular al flujo.

En la anterior ecuación se define:

- $L$  como una longitud característica. Para formas complejas se define como el volumen del cuerpo dividido entre su área superficial.
- $k_f$  como la conductividad térmica del fluido.
- $h$  como el coeficiente de transferencia de calor.

### Numero de Prandtl

La mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límite de la velocidad y térmica es por medio del parámetro número de Prandtl adimensional, definido como

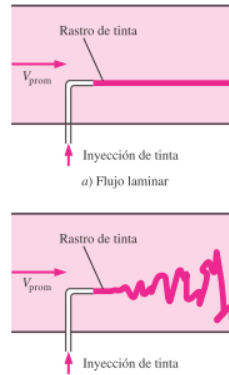
$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (10)$$

Los numero de Prandtl de los fluidos can desde menos de 0.01 para los metales líquidos, hasta más de 100 000 para los aceites pesados.

### Clasificación de los flujos de fluidos

La transferencia de calor por convección está íntimamente ligada a la mecánica de fluidos, que es la ciencia que trata del comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento y de su interacción con sólidos o con otros fluidos en las fronteras. Existe una amplia variedad de problemas de flujo de fluidos que se encuentra en la práctica, y suelen ser conveniente clasificarlos con base en algunas características comunes para hacer factible su estudio en grupos.

En conductos o tuberías (en otros sistemas, varía el Reynolds límite)



**ILUSTRACIÓN 27 TIPO DE FLUJO**

Si el número de Reynolds es menor de 2100 el flujo será laminar y si es mayor de 3000 el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación.

Para valores de  $Re \leq 2\ 100$  (para flujo interno en tuberías circulares) el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan sólo en función de los esfuerzos tangenciales existentes. Por eso a este flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.

Para valores de  $2\ 100 \leq Re \leq 3\ 000$  (para flujo interno en tuberías circulares) la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.

Para valores de  $Re \geq 3\ 000$  (para flujo interno en tuberías circulares) después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento, es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (11)$$

### Flujo laminar

Es uno de los dos tipos principales de flujo en fluido. Se llama flujo laminar o corriente laminar, al movimiento de un fluido cuando éste es ordenado, estratificado, suave. En un flujo laminar el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente. En flujos laminares el mecanismo de transporte lateral es exclusivamente molecular. Se puede presentar en las duchas eléctricas vemos que tienen líneas paralelas

El flujo laminar es típico de fluidos a velocidades bajas o viscosidades altas, mientras fluidos de viscosidad baja, velocidad alta o grandes caudales suelen ser turbulentos. El número de Reynolds es un parámetro adimensional importante en las ecuaciones que describen en qué condiciones el flujo será laminar o turbulento. En el caso de fluido que se mueve en un tubo de sección circular, el flujo persistente será laminar por debajo de un número de Reynolds crítico de aproximadamente 2040. Para números de Reynolds más altos el flujo turbulento puede sostenerse de forma indefinida. Sin embargo, el número de Reynolds que delimita flujo turbulento y laminar depende de la geometría del sistema y además la transición de flujo laminar a turbulento es en general sensible a ruido e imperfecciones en el sistema.

El perfil laminar de velocidades en una tubería tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo. En este caso, la pérdida de energía es proporcional a la velocidad media, mucho menor que en el caso de flujo turbulento.

### Flujo turbulento

En mecánica de fluidos, se llama flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos, (no coordinados) como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, más precisamente caótica.

### Transferencia de calor

Los fenómenos que afectan la fuerza de resistencia al movimiento también afectan la transferencia de calor y este efecto aparece en el fenómeno de Nusselt. Los datos experimentales para la transferencia de calor a menudo se representan de manera conveniente por precisión razonable mediante una simple relación de la ley de las potencias de la forma

$$Nu = C Re_L^m Pr^n \quad (12)$$

Donde  $m$  y  $n$  son exponentes constantes y el valor de la constante  $c$  depende de la configuración geométrica y del flujo.

La temperatura del fluido en la capa límite térmica varía desde  $T_s$  en la superficie, hasta alrededor de  $T_\infty$ , en el borde exterior de esa capa. Las propiedades de los fluidos también varían con la temperatura y, por consiguiente, con la posición a lo largo de la capa límite. La velocidad de la transferencia de calor hacia la superficie isotérmica, desde esta, se puede determinar a partir de

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_m) \quad (13)$$

### Convección interna forzada

En ausencia de cualesquiera interacción de trabajo (como el calentamiento mediante resistencia eléctricas), la ecuación de conservación de la energía para el flujo estacionario de un fluido en un tubo se expresa como.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_e - T_i) \quad (14)$$

Donde  $T_i$  y  $T_e$  son las temperaturas medias del fluido en la entrada y salida del tubo, respectivamente, y  $\dot{Q}$  es la razón de la transferencia de calor hacia el fluido o de este. Note que la temperatura del fluido que fluye en un tubo permanecerá constante en ausencia de cualquier interacción de energía a través de la pared.

Con base en la ley de Newton del enfriamiento, la razón de la transferencia de calor desde o hacia un fluido, que fluye en un tubo se puede expresar como.

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_m)_{prom} \quad (15)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio,  $A_s$  es el área superficial para la transferencia de calor (es igual  $\pi DL$  para un tubo circular de longitud  $L$ ) y  $\Delta T_{prom}$  es alguna diferencia promedio apropiada de temperatura entre el fluido y la superficie.

Considere el calentamiento de un fluido en un tubo de sección transversal constante cuya superficie interior se mantiene a una temperatura constante de  $T_s$ , se sabe que la temperatura media del fluido  $T_m$  aumenta en dirección del flujo como consecuencia de la transferencia de calor. El balance de energía sobre un volumen diferencial de control

$$\dot{m}c_p \Delta T = hA_s(T_s - T_m) \quad (16)$$

Es decir el aumento en la energía del fluido (representado por un aumento en su temperatura  $T_m$ ) es igual al calor transferido por convección hacia este último desde la superficie del tubo. Dado que el área superficial  $A_s = p \cdot L$  donde  $p$  es el perímetro del tubo y  $\Delta T$  es igual a  $(T_s - T_m)$  puesto que  $T_s$  es constante la relación se puede expresar como

$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = \frac{hp}{\dot{m}c_p} dx \quad (17)$$

Al integrar desde  $x = 0$  (admisión del tubo donde  $T_m = T_i$  (temperatura inicial)) hasta  $x = L$  (salida del tubo donde  $T_m = T_e$ ) da

$$\ln \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} = -\frac{hA_s}{\dot{m}c_p} \quad (18)$$

Donde  $A_s = pL$  es el área superficial del tubo y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio constante. Al toma la exponencial de ambos miembros y despejar  $T_e$  se obtiene la siguiente relación, la cual resulta muy útil para determinar la temperatura útil a la salida del tubo:

$$T_e = T_s - (T_s - T_i)\exp(-hA_s/\dot{m}c_p) \quad (19)$$

Note que la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie decae exponencialmente en la dirección del flujo y la rapidez del decaimiento depende de la magnitud del exponente  $hA_s/\dot{m}c_p$

Al sustituir  $\dot{m}c_p$  de la ecuación

$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = \frac{hp}{\dot{m}c_p} dx \quad (20)$$

Da como resultado

$$\dot{m}c_p = \frac{hA_s}{\ln[(T_s - T_e)/(T_s - T_i)]} \quad (21)$$

Lo que da como resultado

$$\dot{Q} = hA_s \Delta T_{lm} \quad (22)$$

Donde la ecuación 23

$$\Delta T_{lm} \frac{T_i - T_e}{\ln[(T_s - T_e)/(T_s - T_i)]} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln(\Delta T_i/\Delta T_e)} \quad (23)$$

Es la diferencia logarítmica de temperatura. Note que  $\Delta T_i = T_s - T_i$  y  $\Delta T_e = T_s - T_e$  son las diferencias de temperatura entre la superficie y el fluido en la admisión y la salida del tubo, respectivamente.

### Numero de Nusselt para flujo laminar

#### Flujo constante de calor en la superficie para flujo laminar

Para el flujo completamente desarrollado en un tubo circular sujeto a flujo de calor constante en la superficie, se tiene, con base en la ecuación

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} = \frac{2\dot{q}_s}{\rho V_{prom} c_p R} = \text{constante} \quad (24)$$

Si en la deducción de la ecuación

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (25)$$

Se considera la conducción de calor en la dirección de x, daría un término adicional  $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ , el cual sería igual a cero, y que  $\frac{\partial T}{\partial x} = \text{constante}$  y, por tanto  $T = T(r)$ . Por lo tanto, en este caso, se satisface con exactitud la suposición de que no se tiene conductividad de calor axial.

Al sustituir la ecu. 25 Y la relación para el perfil de velocidad da como resultado

$$\frac{4\dot{q}_s}{kR} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) \quad (26)$$

La cual es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden. Su solución general se obtiene mediante la separación de las variables e integrar dos veces, para dar

$$T = \frac{\dot{q}_s}{kR} \left( r^2 - \frac{r^4}{4R^2} \right) + C_1 r + C_2 \quad (27)$$

La solución deseada para el problema se obtiene al aplicar las condiciones de frontera  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  en  $r = 0$  lo que se obtiene es.

$$T = T_s - \frac{\dot{q}_s R}{k} \left( \frac{3}{4} - \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^4}{4R^4} \right) \quad (28)$$

La temperatura media de la nada  $T_m$  se determina al sustituir las relaciones de los perfiles de velocidad y de temperatura

$$T_m = T_s - \frac{11 \dot{q}_s R}{24 k} \quad (29)$$

Al combinar la relación con  $\dot{q}_s = h(T_s - T_m)$  da

$$h = \frac{24 k}{11 R} = \frac{48 k}{11 D} = 4.36 \frac{k}{D} \quad (30)$$

O bien

$$\text{Tubo circular, laminar } (\dot{q}_s = \text{constante}): \quad Nu = \frac{hD}{k} = 4.36 \quad (31)$$

Por lo tanto, para el flujo laminar completamente desarrollado en un tubo sujeto a flujo de calor constante en la superficie, el número de Nusselt es constante. No se tiene dependencia con respecto a los números de Reynolds o de Prandtl.

### Temperatura superficial constante flujo laminar

Se puede realizar análisis semejante para el flujo laminar completamente desarrollado en un tubo circular para el caso de temperatura superficial constante  $T_s$ . en este caso el procedimiento de solución es más complejo, ya que se requiere iteraciones, pero la relación del número de Nusselt que se tiene es igualmente simple.

$$\text{Tubo circular, laminar } (T_s = \text{constante}): \quad Nu = \frac{hD}{k} = 3.66 \quad (32)$$

La conductividad térmica  $k$  a usarse en las relaciones de  $Un$  antes dadas deben evaluarse en la temperatura media de la masa del fluido, la cual es el promedio aritmético de las temperaturas medias del fluido en la admisión y la salida del tubo. Para el flujo laminar el efecto de la aspereza superficial sobre el factor de fricción y el coeficiente de transferencia de calor es despreciable.

Para un tubo circular de longitud  $L$  sujeto a temperaturas superficiales constantes, el número promedio de Nusselt para la región de entrada térmica se puede determinar a partir de

$$\text{Región de entrada, laminar: } Nu = 3.66 + \frac{0.065 (D/L) Re Pr}{1 + 0.04[(D/L) Re Pr]^{2/3}} \quad (33)$$

Note que el número de Nusselt promedio es más grande en la región de entrada, como era de esperarse, y tiende a formar asintótica al valor completamente desarrollado de 3.66 cuando  $L \rightarrow \infty$ . En esta relación se supone que el valor esta hidrodinámicamente desarrollado cuando el fluido entra en la sección calentamiento, pero también se puede usar en forma aproximada para el flujo en desarrollo hidrodinámico.

Cuando la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido es grande, puede ser necesario tomar en cuenta la variación de la viscosidad con la temperatura. En ese caso, se puede determinar el número de Nusselt promedio para el flujo laminar en el desarrollo en un tubo circular a partir de

$$Nu = 1.86 \left( \frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (34)$$

Todas las propiedades se evalúan en la temperatura media de la masa del fluido, excepto  $\mu_s$ , la cual se evalúa en la temperatura de superficie.

El número de Nusselt promedio para la región de entrada térmica de flujo entra placas paralelas isotérmicas de longitud  $L$  se expresa como

$$\text{Región de entrada, laminar: } Nu = 7.54 + \frac{0.03 (D_h/L) Re Pr}{1 + 0.016[(D_h/L) Re Pr]^{2/3}} \quad (35)$$



Donde  $D_h$  es el diámetro hidráulico, el cual es el doble del espaciamiento entre las placas. Esta relación se puede usar para  $Re \leq 2\ 800$ .

### Numero de Nusselt para flujo turbulento

Al principio se mencionó que el flujo en los tubos lisos es completamente turbulento a  $Re > 3000$ . El flujo turbulento se utiliza de manera común en la práctica debido a los coeficientes más altos de transferencia de calor asociados a él. La mayor parte de las correlaciones para el coeficiente de fricción y de transferencia de calor en el flujo turbulento se basan en estudios experimentales debido a la dificultad para tratar en forma teórica con este tipo de flujo.

Pero los tubos lisos, el factor de fricción en el flujo turbulento se puede determinar a partir de la ecuación de petukhov

$$\text{Tubos lisos: } f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad 3\ 000 < Re < 5 \times 10^6 \quad (36)$$

El número de Nusselt para flujo turbulento está relacionado con el factor de fricción a través de la analogía de chilton-colburn, que expresa

$$Nu = 0.125 f Re Pr^{1/3} \quad (37)$$

Una vez que se cuenta con el factor de fricción, se puede usar esta ecuación de manera conveniente con el fin de evaluar el número de Nusselt tanto para los tubos lisos como para los ásperos.

Para el flujo turbulento completamente desarrollado en tubos lisos, se puede obtener una relación simple para el número de Nusselt al sustituir en la ecu. 37 de la simple relación de la ley de potencia  $f = 0.184 Re^{-0.2}$  para el factor de fricción. Esto da

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad \left( \begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10\ 000 \end{array} \right) \quad (38)$$

La cual se conoce como ecuación de colburn. Se puede mejorar la precisión de esta ecuación al modificar como

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (39)$$

Donde  $n = 0.4$  para el calentamiento y  $0.3$  para el enfriamiento del fluido que fluye por el tubo. Esta ecuación se conoce como ecuación de Dittus-Boelter y se prefiere a la de colburn.

Las relaciones antes dadas no son muy sensibles a las condiciones térmicas en las superficies del tubo y se pueden usar tanto para el caso de  $T_s = \text{constante}$  como para el de  $q_s = \text{constante}$ . A pesar de su sencillez, las relaciones ya presentadas dan resultados suficientemente precisos para la mayor parte de los fines de ingeniería. También se pueden usar para obtener estimaciones aproximadas del factor de fricción y de los coeficientes de transferencia de calor en la región de transición.

Una vez que se conocen el número de Nusselt, los coeficientes de convección para las superficies se determinan con la ecuación 9

### Convección externa forzada

En la práctica es común encontrar flujo cruzado sobre banco de tubos en equipos de transferencia de calor, como los condensadores y evaporadores de plantas generadores de energía eléctrica, los refrigeradores y los acondicionadores de aire. En ese equipo, un fluido se mueve por dentro de los tubos, mientras que el otro se mueve sobre estos en una dirección perpendicular.

El flujo por el interior de los tubos se puede analizar al considerar el flujo por uno solo de ellos, y multiplicar los resultados por el número de tubos. Sin embargo, este no es el caso para el flujo sobre los tubos, ya que influyen sobre el patrón de flujo y el nivel de turbulencia corriente abajo y, por consiguiente, sobre la transferencia de calor hacia ellos o desde de ellos,

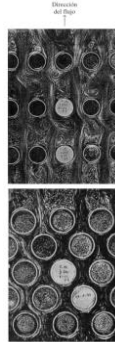


ILUSTRACIÓN 28 HAZ DE TUBOS

Por lo tanto, cuando se analiza la transferencia de calor desde un banco de tubos en flujo cruzado, se deben considerar a la vez todos los tubos en el haz.

Los tubos en un banco suelen disponerse alineados o escalonados en la dirección del flujo. El diámetro exterior de los tubos en el banco se caracteriza por el paso transversal  $S_T$ , el caso longitudinal  $S_L$  y el paso diagonal  $S_D$  entre los centros de los tubos. El paso diagonal se determina a partir de

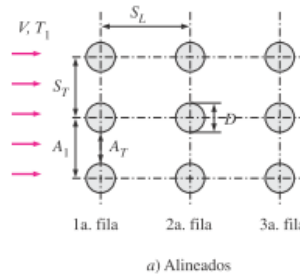
$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2} \quad (40)$$

Conforme el fluido entra en el banco, el área de flujo disminuye de  $A_1 = S_T L$  hasta  $A_T = (S_T - D)L$  entre los tubos y, como consecuencia, la velocidad del flujo aumente. En la disposición escalonada la velocidad puede aumentar todavía más en la región diagonal si las filas de tubos están muy próximas entre sí. En los bancos de tubos las características del flujo son denominadas por la velocidad máxima  $V_{max}$  que se tiene dentro del banco más que por la velocidad aproximada  $V$ . Por lo tanto, el número de Reynolds se definen sobre la base de la velocidad máxima como

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu} \quad (41)$$

La velocidad máxima se determina con base en el requerimiento de conservación de la masa para el flujo incompresible estacionario. Para la disposición de alineados, la velocidad máxima de tiene en el área mínima de flujo entre los tubos y la conservación de la masa se puede expresar como

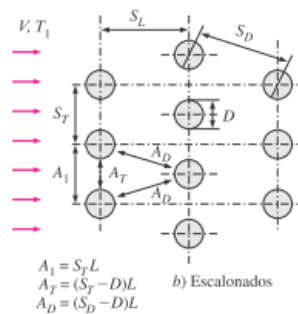
$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (42)$$



a) Alineados  
**ILUSTRACIÓN 29 BANCO DE TUBOS ALINEADOS**

En la disposición escalonada el fluido que se aproxima a través del área  $A_1$  pasa por el área  $A_T$  y, después, por el área  $2A_D$ , conforme se enrolla alrededor del tubo de la fila siguiente. Si  $2A_D > A_T$ , todavía la velocidad máxima ocurre en  $A_T$  entre los tubos y, por consiguiente, la relación  $V_{max}$  de la ec. 42 se puede usar para bancos escalonados. Pero si  $2A_D < A_T$ , se tendrá la velocidad máxima en las secciones transversales diagonales y, en este caso, esa velocidad máxima queda

$$\begin{aligned} \text{escalonada y } S_D < (S_T + D)/2: \quad V_{max} & \quad (43) \\ & = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \end{aligned}$$



b) Escalonados  
**ILUSTRACIÓN 30 BANCO DE TUBOS ESCALONADOS**

Ya que  $\rho V A_1 = \rho V_{max} (2A_D)$  o bien,  $2V_{max} (S_D - D)$

La naturaleza del flujo alrededor de un tubo en la primera fila se asemeja al flujo sobre un solo tubo en especial cuando los tubos no están demasiado próximos entre sí. Por lo tanto, cada uno de los tubos en un banco que conste de una sola fila transversal se puede tratar como un solo tubo en flujo cruzado. Sin embargo la naturaleza del flujo alrededor de un tubo de la segunda fila y de las subsiguientes es muy diferente, debido a las estelas formadas y a la turbulencia causada por los tubos corriente arriba.

El nivel de turbulencia y por consiguiente, el coeficiente de transferencia de calor se incrementa con el número de filas en virtud de los efectos combinados de las filas corriente arriba. Pero no se tiene un cambio significativo en el nivel de turbulencia después de unas cuantas de las primeras filas y, de este modo, el coeficiente de transferencia de calor permanece constante.

Se tiene interés en el coeficiente de transferencia de calor promedio para toso el banco de tubos, el cual depende del número de filas a lo largo del flujo así como de la disposición y del tamaño de los tubos.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (44)$$

Donde los valores de las constantes  $C$ ,  $m$  y  $n$  dependen del valor del número de Reynolds.

Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para  $N > 16$  y  $0.7 < Pr < 500$  (tomado de Zukauskas, 1987)\*

Disposición	Rango de $Re_D$	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar en la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar en  $T_s$ ).

### ILUSTRACIÓN 31 NÚMERO DE NUSSOLT SOBRE BANCO DE TUBOS

Entonces la razón de la transferencia de calor se puede determinar a partir de

$$\dot{Q} = hA_s \Delta T_{lm} = \dot{m}c_p(T_e - T_i) \quad (45)$$

Donde  $A_s = N\pi DL$  es el área superficial de transferencia de calor y  $\dot{m} = \rho V(N_T S_T L)$  es el gasto de masa de fluido. Aquí,  $N$  es el número total de tubos en el banco,  $N_T$  es el número de tubos en un plano transversal,  $L$  es la longitud de los tubos y  $V$  es la velocidad del flujo justo antes de entrar al banco.

#### Equipo de bombeo

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

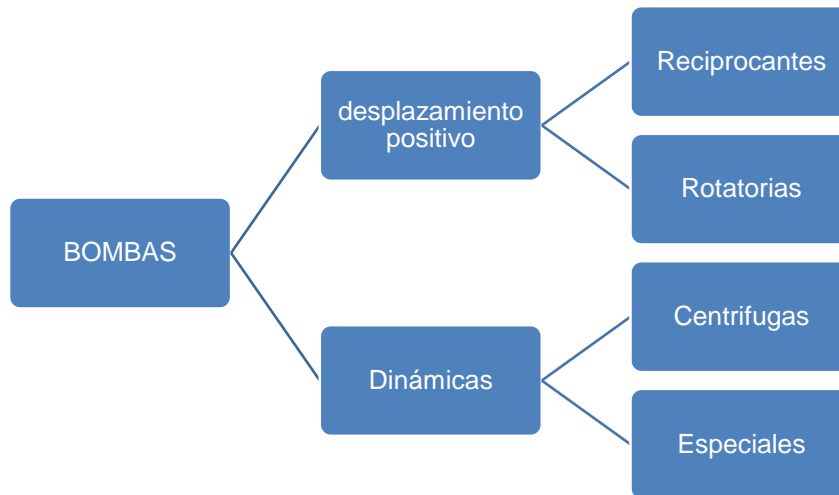
Así, existen bombas que se utilizan para cambiar la posición de un cierto fluido. Un ejemplo lo constituye una bomba de pozo profundo, que adiciona energía para que el agua del subsuelo salga a la superficie.

Un ejemplo de bombas que adicionan energía de presión sería un acueducto, en donde las alturas, así como los diámetros de tubería y velocidades fuesen iguales, en tanto que la presión es aumentada para vencer las pérdidas de fricción que se tuviesen en la conducción.

En la mayoría de las aplicaciones de energía conferida por una bomba es una mezcla de las tres, (posición, presión y velocidad), las cuales se comportan con los principios de la mecánica de fluidos.

#### Clasificación general de las bombas

Existen varios tipos de bombas que se pueden clasificar de la siguiente manera:



**ILUSTRACIÓN 32 BOMBA CENTRIFUGA**

Una bomba centrífuga consiste en un rodete que produce una carga de presión por la rotación del mismo dentro de una cubierta. Las diferentes clases de bombas se definen de acuerdo con el diseño del rodete, el que puede ser para flujo radial o axial.

#### **Tipo Radial**

Este rodete envía por una fuerza centrífuga, el flujo del fluido en dirección radial hacia la periferia de aquel. La carga de velocidad es convertida a carga de presión en la descarga de la bomba. Por lo general, los alabes (aletas) de estos rodetes están curvados hacia atrás. El rodete radial ha sido el tipo más comúnmente usado.

#### **Flujo axial o tipo hélice**

Casi toda la carga producida por este rodete es debida a la acción de empuje de las aletas. El fluido entra y sale del rodete en dirección axial o casi axial.

#### **Flujo mixto**

La carga se desarrolla con un rodete delgado, en parte por fuerza centrífuga y en parte por el empuje de las aletas.

Esto se consigue construyendo aletas de curva doble o en forma de hélice, de tal forma que la descarga es una combinación de flujo axial y radial.

Los cambios de las características de los rodetes tipo radial con respecto a los de tipo axial son, respectivamente, de carga grande y flujo moderado a flujo extremadamente grande y carga baja.

### Diseño del Sistema

Cuando un proceso precisa la instalación de una bomba, lo primero es el diseño de la instalación; punto este que debe estudiarse con cuidado, para evitar detalles errados, presentando especial atención a la línea de aspiración; evitando bolsas de aire, exceso de codos y malas disposiciones de estos; así como un correcto dimensionamiento de la tubería.

Seguidamente para el cálculo del sistema se debe tener presente que los datos sean lo más exacto en cuanto a caudales, presiones necesarias en la descarga, fluctuaciones de nivel o presión en la aspiración, recorrido geométrico de la tubería, peso específico del fluido, viscosidad, temperatura, presión de vapor y cualquier otro parámetro que pueda influir en la determinación de la curva de carga del sistema.

Con estos datos se construirá la curva de carga de la instalación y se revisará la lista de los resultados, si es necesario, hacer alguna modificación en el diseño.

Las pérdidas por fricción se presentan porque al estar el fluido en movimiento habrá una resistencia que se opone a dicho movimiento (fricción al fluir), convirtiéndose parte de la energía del sistema en energía térmica (calor), que se disipa a través de las paredes de la tubería por la que circula el fluido. Las válvulas y accesorios se encargan de controlar la dirección o el flujo volumétrico del fluido generando turbulencia local en el fluido, esto ocasiona una pérdida de energía que se transforma en calor. Estas últimas pérdidas son consideradas pérdidas menores ya que en un sistema grande las pérdidas por fricción en las tuberías son mayores en comparación a la de las válvulas y accesorios.

Las pérdidas y ganancias de energía en un sistema se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por él. Esto también se conoce como carga (h)

$h_L$  = Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías, o pérdidas menores por válvulas y otros accesorios. La magnitud de las pérdidas de energía que produce la fricción del fluido, las válvulas y accesorios, es directamente proporcional a la carga de velocidad del fluido. Esto se expresa en forma matemática así:

$$h_L = k(v^2/2g)$$

El término k es el coeficiente de resistencia

Como se trata de un fluido también se requiere el uso del número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Un medio para predecir este comportamiento en el flujo es con el manejo del número adimensional Reynolds, demostrado por Osborne Reynolds. Esta ecuación se define como la ecuación 11.

Teniendo en cuenta la ecuación general de la energía, es de resaltar que el término  $h_L$  es la pérdida de energía en el sistema. De forma matemática esta se expresa a través de la ecuación de Darcy

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde f es el factor de fricción, L la longitud de la corriente, D el diámetro de la tubería, v la velocidad promedio del flujo.

Este factor de fricción, f, se evalúa dependiendo del régimen en el que se encuentre el fluido. Una vez se tenga certeza del régimen en el que se está, se aplica alguna de las siguientes expresiones

$$f = \frac{64}{Re} \text{ para flujo laminar.}$$

$$f = \frac{1.325}{[\ln(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^2} \text{ para el regimen turbulento.}$$

Es importante resaltar que las pérdidas por fricción también se dan por los accesorios que posean las tuberías para esto se aplica la relación siguiente.

$$h_L = K_f(v^2/2g)$$

Donde  $K_f$  es el factor de perdida para el accesorio

Accesorios	K
Válvula de globo completamente abierta	10.0
Válvula de ángulo completamente abierta	5.0
Válvula de retención de columpio abierta	2.5
Válvula de compuerta abierta	0.19
Codo en U	2.2
Conexión en T estándar	1.8
Codo estándar	0.9
Codo de radio medio	0.75
Codo de radio largo	0.60
Codo de 45 grados	0.45
Válvula de control abierta	3.0
De depósito a tubería a ras	0.50
De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1.00

ILUSTRACIÓN 33 PERDIDA POR ACCESORIO

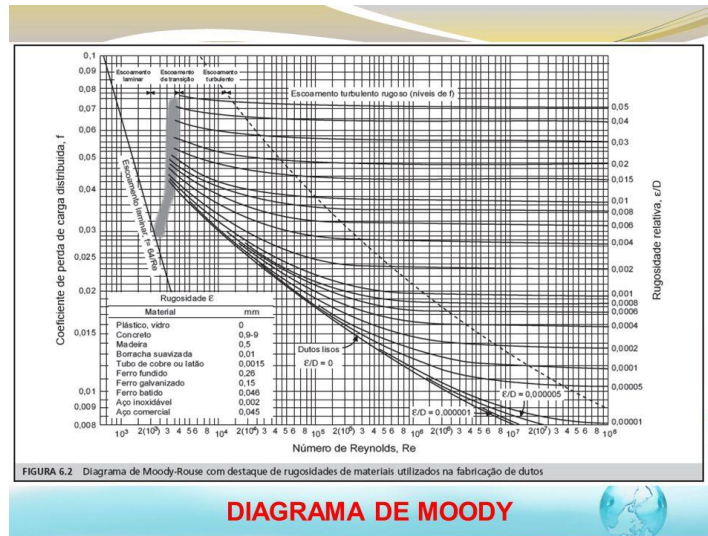


FIGURA 6.2 Diagrama de Moody-Rouse com destaque de rugosidades de materiais utilizados na fabricação de dutos

DIAGRAMA DE MOODY

ILUSTRACIÓN 34 DIAGRAMA DE MOODY

### Bombas de recirculación de líquido térmico

Las bombas recirculadoras de líquido térmico se encargan del movimiento del fluido a través de la tubería existen con una gran variedad desde temperaturas máximas de trabajo como de caudales. Las bombas son una parte esencial en un sistema que trabaja con calentador de líquido térmico ya que este actúa como el corazón del sistema que le permita alcanzar todos aquellos lugares y componentes que dependen del líquido.



**ILUSTRACIÓN 35 BOMBA RECIRCULADORA**

### **Bomba centrífuga La UPE de Grundfos**

La UPE de Grundfos es una bomba centrífuga con rotor encapsulado para la circulación de aceite en sistemas de calefacción más pequeños en edificios comerciales. Presenta control electrónico de la velocidad del rendimiento de la bomba.

Esta bomba está basada en tecnología de rotor encapsulado o bomba sin cierre. El líquido bombeado se enfría y, de esta forma, lubrica el motor y las piezas giratorias.

Las bombas circuladoras UPE se utilizan normalmente en edificios comerciales como colegios, hospitales y edificios de oficinas para la circulación de aceite caliente.

UPE Serie 2000 es adecuada para sistemas con:

- un caudal constante donde se desee optimizar el ajuste del punto de trabajo de la bomba
- temperaturas caudal-tubería variables.

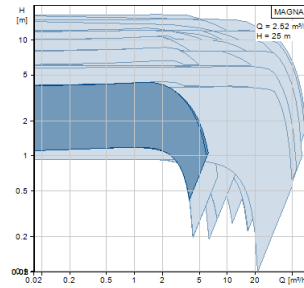
La bomba ofrece las siguientes funciones:

- Control de la presión proporcional (ajuste de fábrica): La altura se modifica de acuerdo con la demanda de caudal. La altura deseada puede ajustarse en el panel de control de la bomba.
- Control de la presión constante: Se mantiene una altura constante, independientemente de la demanda de caudal. La altura deseada puede ajustarse en el panel de control de la bomba.
- Trabajo de curva constante: La bomba funciona a una velocidad constante o entre las curvas máx. y mín.
- Influencia de temperatura: La altura varía dependiendo de la temperatura del líquido.



**ILUSTRACIÓN 36 BOMBA RECIRCULADORA UPE**





**ILUSTRACIÓN 37 GRAFICA FUNCIONAMIENTO DE RECIRCULADORA UPE**

**Bomba recirculadora GRAINGER**

**Descripción:**

Bomba circuladora, reforzador de 3 Piezas lubricado con aceite, 1/12 HP, 1 fase, voltaje 115 V, amperaje 1.75 A, entrada/salida embreadada, carcasa de hierro fundido, temperatura máxima 572 F, presión operativa máxima 125 PSI, Especificaciones Técnicas

Longitud (in):14 7/8

Pies de la cabeza al 5 gpm:8

Incluye: juntas, tornillos, y aceite

Pies de altura a 20 gpm: 5

gpm máximo en la cabeza (pies):32 @ 1

gpm de agua a 3 pies de la cabeza: 28

Pies de la cabeza @ 6 gpm: 8

Voltaje: 115

gpm de agua @ 7 pies. de la cabeza: 15

Tipo de cojinete: chumacera

pies de altura de 12 gpm: 7

Ancho (pulg):4 1/4

Pies de la cabeza @ 9 gpm: 8

Pies de la cabeza a los 18 gpm: 6

Pies de altura a 30 gpm: 2

Pies de altura a 10 gpm: 7

Cierre (pies):8

Hp: 1/12

gpm de agua a 2 pies. De la cabeza: 30

Material de la vivienda: hierro fundido

gpm de agua a 1 pie de la cabeza: 32

Fase: 1

Artículo: bomba de circulación de la bomba  
Mejor eficiencia gpm en la cabeza (pies):17 @ 6

Presión máxima de trabajo (psi):125

gpm de agua a 5 pies de la cabeza: 23

Pies de la cabeza @ 15 gpm: 7

Pies de altura a 25 gpm: 4

Tipo: 3 piezas de aceite lubricado booster

Protección térmica: automático

Pies de la cabeza a 8 gpm: 8

gpm mínimo en la cabeza (pies):9 @ 8

Temperatura máxima (°f):225

gpm de agua a 8 pies. De la cabeza: 9

Entrada/salida: con brida

amps: 1.75

Cara a cara dimensión (pulgadas):6 3/8

Brida / unión incluida: no

Pies de la cabeza @ 7 gpm: 8

gpm de agua a 4 pies. De la cabeza: 25

gpm de agua a 6 pies de la cabeza: 19



**ILUSTRACIÓN 38 BOMBA RECIRCULADORA GRAINGER**

**La serie cn: química normalizada iso 2858/iso 5199 pn16 de impulsor cerrado.**



**ILUSTRACIÓN 39 BOMBA RECIRCULADORA SERIE CN**

Construcción:

- Construcción según ISO 5199 y dimensiones según ISO 2858.
- Diseño PROCESS: desmonte sin desacoplar las tuberías o el motor.
- Prevista para los servicios severos y continuos.
- Bridas estándares DIN/NFE PN16.
- Bastidor de 3 rodamientos lubricados por el aceite del engrasador de nivel constante.
- Impulsor cerrado, con anillo de usura sobre cuerpo. Anillo de usura sobre impulsor en opción según tamaño.
- Eje totalmente protegido del líquido bombeado.
- Estanquidad por trenzas o sello mecánico normalizado simple, doble o tándem.
- Control de la presión en la caja de guarnición por las alabes dorsales del impulsor.
- Cámara de refrigeración en estándar.
- Intercambiabilidad máxima de las piezas constitutivas de la serie.
- Excelente rendimiento.
- NPSH requerido el más bajo.
- Modelos corrientes en stock.

Cualidades técnicas:

- Caudal: de 2 a 5 000 m<sup>3</sup>/h o de 10 a 22 000 U.S GPM.
- Altura manométrica total: hasta 180m o 600pies.
- Presión máxima de servicio: hasta 20 bar.
- Temperatura de servicio admisible: de -40 hasta 300 °C.
- Velocidad máxima: 3 000 rpm a 50 Hz o 3 600 rpm a 60 Hz.



**ILUSTRACIÓN 40 VISTA INTERIOR BOMBA RECIRCULADORA SERIE CN**

## GRUNDFOS ALPHA Pro, GRUNDFOS ALPHA+, UPS, UP Serie 100



ILUSTRACIÓN 41 BOMBA RECIRCULADORA GRUNDFOS ALPHA

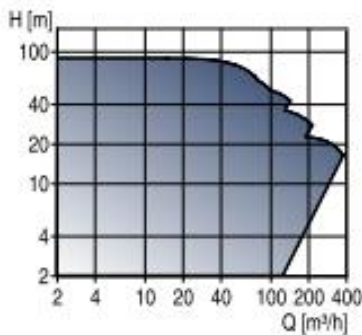


ILUSTRACIÓN 42 GRAFICA BOMBA RECIRCULADORA ALPHA

### Características

- Bajo consumo clasificación energética clase A a C
- Libre de mantenimiento
- Silenciosa
- Amplia gama

### Opciones

- Ajuste automático del funcionamiento
- Pantalla de consumo instantáneo
- Ajustes automáticos de funcionamiento nocturno
- Instalación fácil, enchufe externo para conexión eléctrica
- Ajuste para funcionar con 1, 2 o 3 velocidades
- Versiones dobles.

### Ventiladores

Un ventilador es una máquina de fluido, más exactamente, una máquina neumática, concebida para producir una corriente de aire.

Se utiliza para producir corrientes de aire, es decir, mover el aire para usos muy diversos. Entre ellos, ventilar los ambientes habitados, refrescar objetos o máquinas o para mover gases (principalmente el aire) por un sistema de conducciones.

En su versión más corriente, un ventilador es una máquina que absorbe energía mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión no mayor de 10kPa (1.000 mm.c.a. aproximadamente), por lo que da lugar a una variación muy pequeña

del volumen específico y suele ser considerada una máquina hidráulica (más propiamente, una máquina neumática).

En un sistema de radiador el ventilador ocupa un lugar importante ya que este le ayuda a la liberación de energía al medio ambiente lo que se le conoce como convección forzada



**TAT**  
**EXTRACTORES TUBULARES**  
630, 800 Y 1000 mm. de diámetro

- Hélice fabricada en aluminio fundido de alta calidad, protección en poleas y bandas, motor externo al paso del aire, carcasa tubular fabricada en acero.
- Campanas de extracción, cuartos de pintura, instalaciones en ducto donde sea necesario la impulsión de aire, estacionamientos, procesos industriales específicos, etc.

Modelo	Código	Velocidad R.P.M.	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal descarga libre m3/hr / CFM	Presión sonora dB(A)	Peso aprox. Kg	Precio Público MXP
TAT-630/L	5STAT-630/18	1300	1	208-230/460	3.0/1.5	11,080 / 6,518	68	48	\$ 8,185.00
TAT-630/H	5STAT-630/32	1300	2	208-230/460	6.2/3.1	15,500 / 9,118	72	54	\$ 8,957.00
TAT-800/L	5STAT-800/14	1400	2	208-230/460	6.2/3.1	18,700 / 11,000	75	70	\$ 9,678.00
TAT-800/H	5STAT-800/26	1400	5	208-230/460	15.2/7.6	28,500 / 16,765	79	76	\$ 11,822.00
TAT-1000/L	5STAT-1000/12	1400	5	208-230/460	15.2/7.6	33,300 / 19,588	81	88	\$ 15,180.00
TAT-1000/H	5STAT-1000/18	1400	7 1/2	208-230/460	20.2/10.1	49,600 / 29,176	85	100	\$ 18,242.00

**ILUSTRACIÓN 43 EXTRACTORES TUBULARES TAT**



**TTB-T**  
**EXTRACTORES TUBULARES CON MOTOR EXTERIOR**  
250, 315, 400 y 500 mm. de diámetro

- Carcasa fabricada en acero en una sola pieza, motor fuera del flujo del aire, con protección en poleas y bandas, caja cojinetes con rodamientos a bolas.
- Temperatura máxima de operación: 85 grados C.
- Montaje en conductos, tanto en extremos como intercalados: ventilación general, eliminación de humos, procesos industriales, etc.

Modelo	Código	Velocidad R.P.M.	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal descarga libre m3/hr / CFM	Presión sonora dB(A)	Peso aprox. Kg	Precio Público MXP
TTB-250	5TTB-250	1625	1/8	127	1.4	1,880 / 1,106	74	9	\$ 2,950.00
TTB-315	5TTB-315	1625	1/8	127	1.4	2,678 / 1,575	75	12	\$ 3,233.00
TTB-400	5TTB-400	1500	1/2	127/220	8.03/3.8	3,858 / 2,269	77	13	\$ 4,311.00
TTB-500	5TTB-500	1500	3/4	127/220	12.5/5.5	8,712 / 5,125	81	28	\$ 5,193.00
TTT-400	5TTT-400	1500	1/2	220/440	2.1/1.1	3,858 / 2,269	77	28	\$ 4,308.00
TTT-500	5TTT-500	1500	3/4	220/440	3.0/1.5	8,712 / 5,125	81	35	\$ 5,041.00

**ILUSTRACIÓN 44 EXTRACTOR TUBULAR CON MOTOR EXTERIOR TTB-T**

### Axiales con Transmisión



**HIB-T**  
**EXTRACTORES AXIALES**  
**630, 800, 1000 y 1250 mm. de diámetro**

- Hélices en 6 alabes, alineadas y balanceadas según altos estándares normativos, marco embocadura con venturi en embutición para el óptimo desempeño del ventilador, caja cojinetes con rodamientos a bolas de alta calidad.
- Grandes almacenes y bodegas, industrias en general, invernaderos, salas de espectáculos, gimnasios, etc.

Modelo	Código	Velocidad R.P.M.	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal descarga libre m3/hr / CFM	Presión sonora dB(A)	Peso aprox. Kg	Precio Público MXP
HIB-630	5HIB630	515	1/4	127	6	7,050 / 4,147	65	29	\$ 3,919.00
HIB-800	5HIB800	570	1/3	127	6.6	12,110 / 7,124	70	34	\$ 4,420.00
HIB-1000	5HIB1000	400	1/2	127	9.5	19,950 / 11,735	70	40	\$ 5,329.00
HIB-1250	5HIB1250	400	3/4	127	13.4/6.1	27,095 / 15,938	74	54	\$ 6,669.00
HIT-630	5HIT630	515	1/4	220/440	1.4 / 0.7	7,050 / 4,147	65	29	\$ 4,180.00
HIT-800	5HIT800	570	1/3	220/440	1.6 / 0.8	12,110 / 7,124	70	34	\$ 4,726.00
HIT-1000	5HIT1000	400	1/2	220/440	2.1/1.1	19,950 / 11,735	70	40	\$ 5,679.00
HIT-1250	5HIT1250	400	3/4	220/440	3.0/1.5	27,095 / 15,938	74	54	\$ 7,080.00

### ILUSTRACIÓN 45 EXTRACTORES AXIALES

### Procedimiento

El proceso de rotomoldeo basado en su principio básico de funcionamiento se rige bajo condiciones primarias así como el calor que requiere ser agregado al molde para que este sinterice el polímero o así adopte su forma, de igual manera se requiere desmoldar el elemento y este no es posible sin que este se encuentre a una temperatura más baja por lo que necesita ser eliminada esa cantidad de energía suministrada.

En el caso del uso de intercambiadores de calor el sistema requiere de la selección de los componentes que llevaran a cabo dicha operación los cuales son:

- 1.- principalmente se utilizara un molde que permita el intercambio de calor es decir con pared doble de modo que el líquido térmico y el material a sinterizar no se encuentre en contacto directo, que permita el flujo de fluido y mantenga una temperatura estable en el molde.
- 2.- un sistema de calentamiento que proporcione la potencia al líquido térmico que fungirá como puente de contacto entre la fuente de calor y el elemento a calentar, el líquido térmico debe contar con las propiedades adecuadas para que funcione dentro de los parámetros que el proceso requiere, de la misma forma el calentador deberá cubrir las exigencias que el rotomoldeo posee.
- 3.- un sistema de enfriamiento que se encargue de disminuir la temperatura del molde, el cual se constituirá principalmente de un intercambiador de calor de tipo radiador y un ventilador que acelera su enfriamiento.

Un molde de acero inoxidable utilizado para el proceso de rotomoldeo se calentara de 25°C como temperatura mínima obtenida a 230°C como temperatura máxima de operación por medio de un intercambiador de calor se hará los cálculos necesarios para obtener la energía que requiere el molde para su funcionamiento y así la selección de un calentador adecuado, como del radiador necesario que elimine ese calor alcanzado y así poder retirar el producto al finalizar el proceso.

Las ecuaciones de la transferencia de calor antes discutidas proporcionan los datos necesarios para lograr objetivos.

Conocer la potencia que requiere el molde es la parte principal puesto que se constituirán los parámetros de aplicación.

propiedades del molde	valores	unidades
material del molde	acero inoxidable	
calor específico	490	j/kg*k
Masa	69.30	kg
densidad	7800	kg/m <sup>3</sup>
temperatura inicial	20	°c
temperatura final	230	°c
grosor del molde	0.002	m
área	7.32	m <sup>2</sup>
conductividad térmica	26.1	w/m*k

**ILUSTRACIÓN 46 PROPIEDADES DE MOLDE DE 450L ROTOINNOVACION**

Dimensiones de molde de 450L

- 0.86m de diámetro del cilindro
- 1 m. de altura de la base hasta la tapa
- 0.59m de diámetro del cuello con la que cuenta la tapa
- 0.24m de altura de la tapa

Un sistema de masa fija recibe el nombre de sistema cerrado cuando un sistema cerrado estacionario comprende solo de transferencia de calor y no de interacciones de trabajo a través de su frontera, la relación de balance de energía se reduce a

$$Q = mc_p(T_f - T_i)$$

Determinando el calor total que es transferido al molde, se hará los cálculos para obtener la energía que el calentador suministra y de manera sencilla conocer el tiempo de operación.

El comportamiento del fluido térmico dentro de las líneas del molde propician a la cantidad de transferencia de calor ya que la variación entre flujo turbulento y laminar influyen en su desarrollo, por lo tanto, el fluido se moverá dentro de un intercambiador de calor de tipo encamisado. Por cuestiones de diseño y espacios en el molde predeterminado se establecen las dimensiones del serpentín que se manejara, el cual se constituye de tubo de cobre de espesor delgado de 0.0234m de diámetro con una longitud nominal de 54m

La cantidad de transferencia de calor se encontrara bajo condiciones estacionarias sin pérdidas por radiación

Se estable el tipo de fluido que se utilizara, en este caso es un aceite térmico therminol 55 el cual se conserva estable dentro de los requerimientos del rotomoldeo los cuales son una temperatura de control de 230°C a la cual saldrá del calentador de líquido térmico por lo tanto se considera nuestra temperatura de entrada.

La cantidad de energía que el fluido transferirá al molde será el parámetro para la selección del calentador de líquido térmico ya que esa cantidad de energía que agrega debe mantenerse estable para que tengamos un sistema con una alta eficiencia

Entonces el número de Reynolds se determina a partir de

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Una vez establecido el tipo de flujo se busca la cantidad de energía que proporciona el fluido a su paso a través del molde se considera como convección forzada interna

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_m)_{prom}$$

Por lo que se debe tener el conocimiento del coeficiente de convección promedio

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}}$$

Por lo que es necesario saber el número de Nusselt el cual varía para cada tipo de flujo.

Para flujo laminar:

$$\text{Región de entrada, laminar: } Nu = 3.66 + \frac{0.065 (D/L) Re Pr}{1 + 0.04[(D/L) Re Pr]^{2/3}}$$

Para flujo turbulento:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

La razón promedio de la transferencia de calor requiere de la temperatura promedio de funcionamiento

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_i - T_e}{\ln[(T_s - T_e)/(T_s - T_i)]} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln(\Delta T_i/\Delta T_e)}$$

Para promediar la temperatura se calculara la temperatura de salida del tubo

$$T_e = T_s - (T_s - T_i)\exp(-hA_s/\dot{m}c_p)$$

Una vez que se toman en cuenta estas ecuaciones se puede determinar la cantidad de energía que el fluido proporciona para la selección del calentador de líquido térmico, así como la cantidad de energía que el molde necesita y calcular el tiempo del proceso

Después de haber realizado los cálculos para el calentamiento del molde este debe ser enfriado para continuar con el proceso por lo tanto el fluido se debe hacer pasar por un intercambiador de calor de tipo radiador para que sea arrancado todo ese calor agregado, por lo tanto se fijan las temperaturas a las que el sistema trabajara para calcular las dimensiones del radiador de modo que nos proporcionen estos resultados

El molde deberá ser enfriado de manera constante y sin diferencias abruptas en la temperatura en un promedio de desmolde de 40°C.

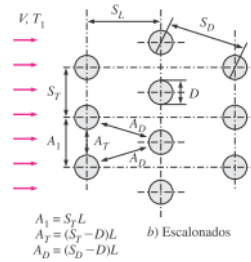
Se calcula la cantidad de energía que se tiene que disipar proveniente del molde para que como se dijo las dimensiones del radiador que se calculara lo logre eliminar en un tiempo adecuado.

Como se mencionó el enfriamiento se llevara a cabo por un radiador por lo tanto el fluido deberá ser establecido y como en calentamiento se aplican las mismas ecuaciones de Reynolds y Nusselt con una diferencia en el cálculo de la transferencia de calor ya que por ser un intercambiador de calor con flujo cruzado la ecuación es modificada

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m$$

La cual nos hace referencia a la aplicación del coeficiente de calor total el cual se constituye de la dada por el flujo del líquido térmico a través del tubo y del fluido en este caso el aire que circula por la parte externa de los tubos con el propósito de enfriarlos

Se busca la geometría del haz de tubos que requerirá para el cálculo de los coeficientes, se considera el haz de tubos de tipo escalonado para que la convección forzada sea más eficiente ya que tratamos con un aceite térmico que cuenta con una pérdida de calor baja.



### Geometría del haz de tubos de tipo escalonado

- $D=0.0164\text{m}$
- $S_L=0.0343\text{m}$
- $S_T=0.0313\text{m}$
- N de filas=7
- N de tubos=85

Se calcula primero el coeficiente de transferencia de calor del fluido que circula por fuera de los tubos del haz de tubos se considera como convección forzada externa. Las propiedades del aire se consideran a  $35^\circ\text{C}$

Se calcula el número de Reynolds para el flujo de aire

$$Re_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu}$$

Para determinar el Reynolds se debe considerar la velocidad máxima que puede alcanzar dentro del haz de tubos

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V$$

Se calcula en Nusselt de acuerdo al cuadro de la ilustración 31 donde se manejan los números con respecto al número de Reynolds.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{0.25}$$

Después de establecer el Nusselt se calcula el coeficiente de transferencia de calor

Se continúa con el cálculo del coeficiente de transferencia de calor que le corresponde al fluido que circula por los tubos del haz de tubos por lo que se considera como convección forzada interna.

De igual forma se analiza el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo que se maneja y utilizar la opción adecuada para calcular el número de Nusselt como se menciona en el cálculo de calentamiento.

De acuerdo al procedimiento que sea implementado se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección interna forzada del tubo, ya que el coeficiente de ambos flujos sea determinado se puede obtener el coeficiente de transferencia total.

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

Con la ecuación de razón de transferencia de calor se calcula la cantidad de energía que disipa el radiador y se hace una comparación de la cantidad de energía con la que se cuenta para saber si cumple con los requerimientos del proceso.



## RESULTADOS, PLANOS, GRAFICAS, PROTOTIPOS Y PROGRAMAS

### Molde para intercambiador de calor

Del diseño que establece la planta se requiere la modificación para que cumpla con la función del flujo del fluido térmico

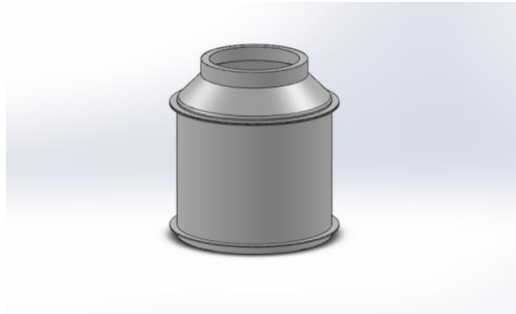


ILUSTRACIÓN 47 MOLDE BASE DE 450L

Tomo el diseño base para la modificación, por lo tanto es al molde de 450L. al que se le agrega una serie de tubería en forma de serpentín que se encargara de mantener el fluido separado



ILUSTRACIÓN 48 TUBO EN FORMA DE SERPENTÍN

El serpentín debe mantener un contacto en todo momento del molde para que no interfiera en la transferencia de calor por lo tanto el diseño se constituirá como se muestra en la ilustración 49.

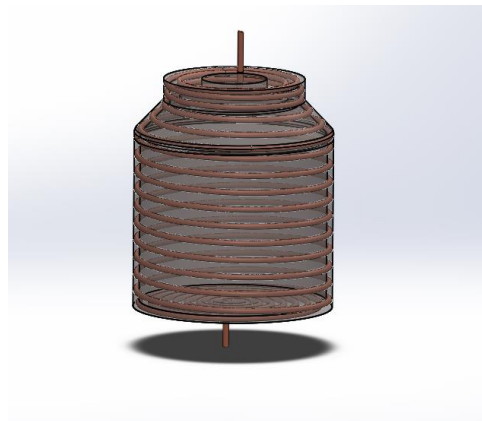


ILUSTRACIÓN 49 ENSAMBLAJE DE SERPENTÍN Y MOLDE DE 450L

El serpentín se encuentra en contacto directo con el molde el cual por medio de transferencia de calor por conducción le transfiere el calor al polímero para finalizar el molde se recubre con otra capa para mantener un molde lo más aislado para disminuir la pérdida de calor por radiación

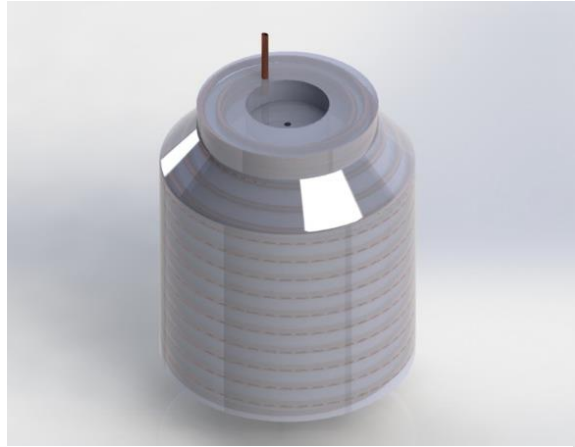


ILUSTRACIÓN 50 VISTA FINAL DE MOLDE MODIFICADO

#### Análisis del sistema de calentamiento

Se descarta la resistencia térmica por el tipo de material del tubo que forma el serpentín que cubre al molde de 450L

Condiciones iniciales del sistema

Temperatura de operación 230°C

Diámetro del tubo (encamisado en forma de serpentín) 0.0234m

Área = 0.000430052m<sup>2</sup>

Longitud del tubo del serpentín= 54m

Caudal del fluido = 0.0007m<sup>3</sup>/s

Propiedades del aceite térmico therminol 55 a 230°C

Densidad 810.3kg/m<sup>3</sup>

Calor específico 2442j/kg. °C

Conductividad térmica 0.1327 w/m °C

Viscosidad cinemática 6.595x10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s

Número de Prandtl 98.31

Velocidad del fluido 1.62m/s

Flujo másico 0.6 kg/s

Potencia que proporciona el flujo del aceite térmico por el serpentín al molde.

Número de Reynolds

$$Re = \frac{1.62 \text{ m/s} * 0.0234\text{m}}{6.595 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 5747.99$$

El flujo que circula por el serpentín es un flujo turbulento por lo tanto se aplica la siguiente relación para determinar el número de Nusselt.

$$Nu = 0.023 * 5747.99^{0.8} 98.31^{0.4} = 146.68$$

Sustituyendo en la ecuación

$$h = \frac{146.68 * 0.1327 w/m^{\circ}C}{0.0234m} = 831.8135 w/m^2.{}^{\circ}C$$

Se determina la temperatura útil de salida del tubo para posteriormente calcular la temperatura promedio logarítmica

$$T_e = 25 - (25 - 230)\exp(-831.8135 * 3.9697m^2/0.6kg/s * 2441j/kg^{\circ}C)$$

$$T_e = 46.50^{\circ}C$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{230^{\circ}C - 46.50^{\circ}C}{\ln \left[ \frac{25^{\circ}C - 46.50^{\circ}C}{25^{\circ}C - 230^{\circ}C} \right]} = 81.376^{\circ}C$$

$$\dot{Q} = 831.8135 w/m^2.{}^{\circ}C * 3.9697m^2 * 81.376^{\circ}C$$

$$\dot{Q} = 268707.6249w$$

Propiedades del molde acero inoxidable

$$Q = 69.30kg * 490j/kg^{\circ}C(230^{\circ}C - 25^{\circ}C)$$

$$Q = 6961185j$$

Se estima que el tiempo aproximado que el fluido necesita para lograr la diferencia de temperatura hasta alcanzar su equilibrio térmico es

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{Q}}$$

$$\Delta t = \frac{6961185j}{268707.6249w} = 25.90s$$

Agregándole el tiempo que le lleva al fluido en recorrer toda la línea de aceite es

$$\Delta t = \frac{54m}{1.62m/s} = 33.33s$$

$$\Delta t = 59.23 \approx 1min \text{ Tiempo aproximado de calentamiento}$$

**Análisis del sistema de enfriamiento**  
**TABLA 7 PROPIEDADES DEL AIRE A 35°C**

Conductividad térmica	0.02625w/m°C
Calor específico	1007j/kg°C
Número de prandtl	0.7268
Viscosidad cinemática	1.655x10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Flujo másico	10.59kg/s
Caudal	9.25m <sup>3</sup> /s
Velocidad	11.77m/2
Densidad	1.145kg/m <sup>3</sup>

Régimen permanente

Radiación despreciable

Pr de la superficie 0.6957

Dimensiones de radiador

$$S_D^2 = (S_L^2 + (\frac{S_T}{2})^2)$$

$$S_D^2 = (0.0343^2 + (\frac{0.0313}{2})^2) = 37.7\text{mm}$$

$$A_1 = (0.0343 - 0.0164)L = (14.9\text{mm})$$

$$A_2 = (14.9 - 0.0164)L = (42.6\text{mm})L$$

$$V_{max} = \frac{0.0313m}{0.0313m - 0.0164m} 11.77 \text{ m/s} = 24.72\text{m/s}$$

$$Re = \frac{24.72\text{m/s} * 0.0164m}{1.655 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}} = 24495.95$$

De acuerdo al cuadro de la ilustración 29 la correlación para encontrar el número de Nusselt

$$Nu_D = 0.35(\frac{S_T}{S_L})^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$$

$$Nu_D = 0.35(0.0313/0.0343) 24495.95^{0.6} 0.7268^{0.36} (0.7268/0.0957)^{0.25}$$

$$Nu_D = 133.157$$

$$h = \frac{133.157 * 0.02625\text{w/m}^\circ\text{C}}{0.0164\text{m}} = 213.1323\text{w/m}^2^\circ\text{C}$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección interna forzada del aceite que pasa por los tubos del radiador.

Condiciones iniciales del proceso

Líquido que entra  $230^{\circ}\text{C}$  y se descenderá hasta los  $40^{\circ}\text{C}$  para el desmolde del tinaco formado dentro del molde. El espesor de los tubos es delgado por lo que se elimina cualquier resistencia térmica que este provoque. Se descartan ganancias de calor por radiación de calor.

$$D = 0.0164\text{m}$$

$$\text{Numero de tubos} = 595$$

$$L = 1\text{m}$$

$$\dot{m} = 0.56721\text{kg/s}$$

$$V = 3.313\text{m/s}$$

$$Re = \frac{3.313\text{m/s} * 0.0164\text{m}}{6.595 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}} = 8238.54$$

$$Nu = 0.023 * 8238.54^{0.8} 98.31^{0.3} = 123.64$$

$$h = \frac{123.64 * 0.1327\text{w/m}^{\circ}\text{C}}{0.0164\text{m}} = 1000.4285\text{w/m}^2\text{C}$$

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor total del radiador

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{213.13\text{W/m}^2\text{C}} + \frac{1}{1000.4285\text{W/m}^2\text{C}}$$

$$U = 175.6985\text{W/m}^2\text{C}$$

Se calcula la cantidad de calor que el radiador tiene que disipar

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_e - T_i)$$

$$\dot{Q} = 0.56721\text{kg/s} * 2441\text{j/kg}^{\circ}\text{C} * (230^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}) = 263.066\text{kW}$$

Teniendo la cantidad de energía que el intercambiador tiene que disipar podremos calcular la temperatura a la que sale el aire después de pasar por el mismo.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_S - T_E) \rightarrow T_S = \frac{263.066\text{kW}}{35.96\text{kg/s} * 1007\text{j/kg}^{\circ}\text{C}} = 42.2646^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_1 = T_{ent} - T_{sal} = (230 - 42.2646) = 187.73^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{sal} - T_{ent} = (40 - 35) = 5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{187.73^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{187.73^{\circ}\text{C}}{5^{\circ}\text{C}}\right)} = 50.4003^{\circ}\text{C}$$

$$A_s = \pi DL$$

$$A_s = \pi * 0.0164\text{m} * 595\text{m} = 30.6556\text{m}^2$$

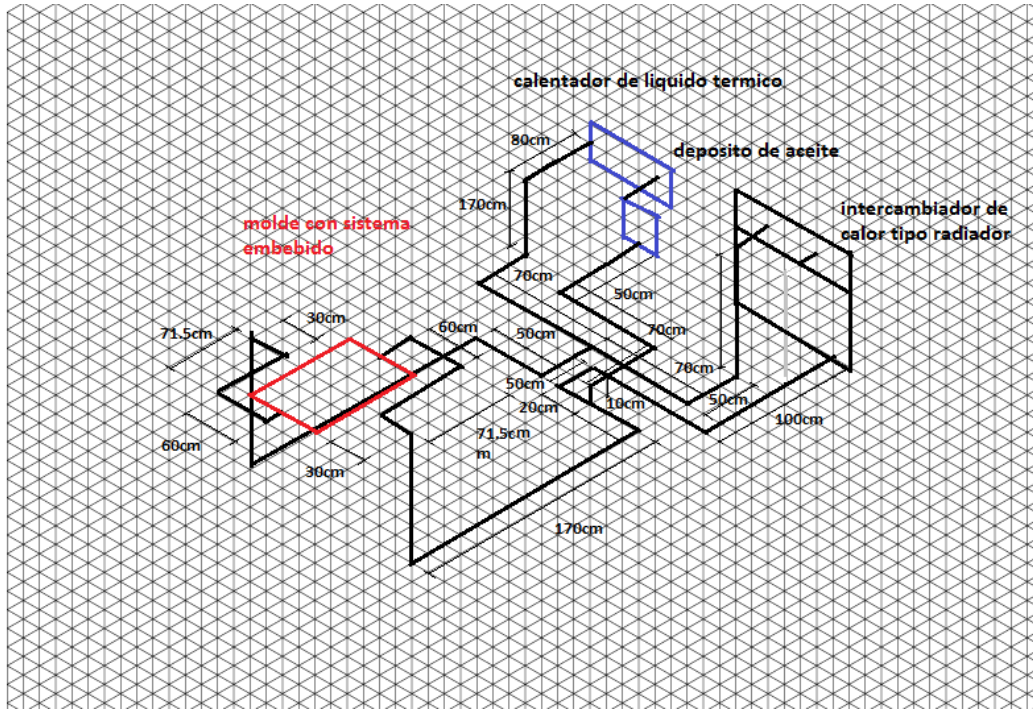
Ahora es posible calcular la cantidad de calor que el intercambiador de calor de tipo radiador puede disipar para enfriar el líquido térmico

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m$$

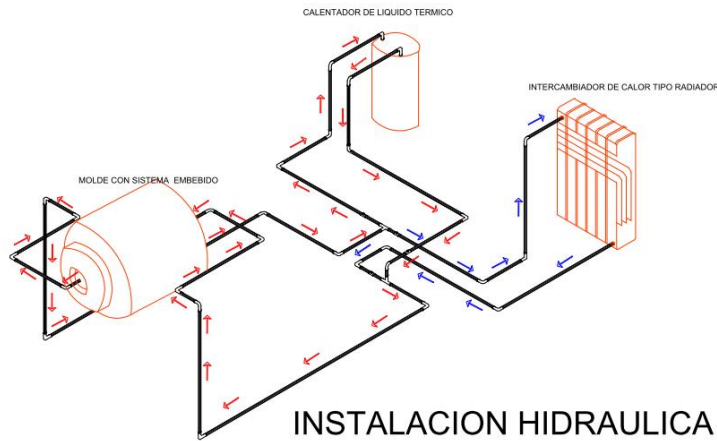
$$\dot{Q} = 175.6985\text{W/m}^2\text{C} * 30.6556\text{m}^2 * 50.4003^{\circ}\text{C} = 271.4642\text{kW}$$

Se conoce la cantidad de energía que el radiador puede disipar

**Instalación hidráulica selección de bombas**



**ILUSTRACIÓN 49 TUBERÍA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO VISTA ISOMÉTRICA**



**INSTALACION HIDRAULICA**

**ILUSTRACIÓN 50 INSTALACIÓN HIDRÁULICA**

### Líneas de calentamiento

$$Re = \frac{1.62 \text{ m/s} * 0.0234 \text{ m}}{6.595 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}} = 5747.99$$

$$f = \frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{0.0015 \times 10^{-3}}{3.7 * 0.0234} + \frac{5.74}{5747.99^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.036365$$

$$h_L = 0.036365 * \frac{70.83}{0.0234} * \frac{1.62^2}{2 * 9.81} = 14.72 \text{ m}$$

- 21 codos de 90° → 18.9
- 2 conexiones a depósito → 1
- 2 conexiones válvula de compuerta → 0.38

$$h_a = 20.28 \left( \frac{1.62^2}{2 * 9.81} \right) = 2.7126$$

$$E_a = Z_2 - Z_1 + \text{perdida}$$

$$E_a = 1.7 \text{ m} + 14.72 \text{ m} + 2.7126 \text{ m} = 19.1326 \text{ m}$$

$$\text{potencia} = \rho * g * E_a * Q$$

$$\text{potencia} = 810.3 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 19.1326 \text{ m} * 0.0007 \text{ m}^3/\text{s} = 106.46 \text{ W} = 0.142 \text{ hp} \rightarrow 0.5 \text{ hp}$$

### Líneas de enfriamiento

Se considera al radiador como perdida por tubería rectora al igual que el serpentín que rodea al molde

$$h_L = 0.036365 * \frac{666.93}{0.0234} * \frac{1.62^2}{2 * 9.81} = 138.63 \text{ m}$$

- 23 codos de 90° → 20.7
- 1 conexión en T → 1.8
- 2 válvula de compuerta abierta → 0.38
- 2 conexiones a tanque → 1

$$\sum K = 23.88 \text{ m}$$

$$h_a = 23.88 \left( \frac{1.62^2}{2 * 9.81} \right) = 3.199 \text{ m}$$

$$h_a = 0.17 \left( \frac{1.62^2}{2 * 9.81} \right) = 0.095 \text{ m}$$

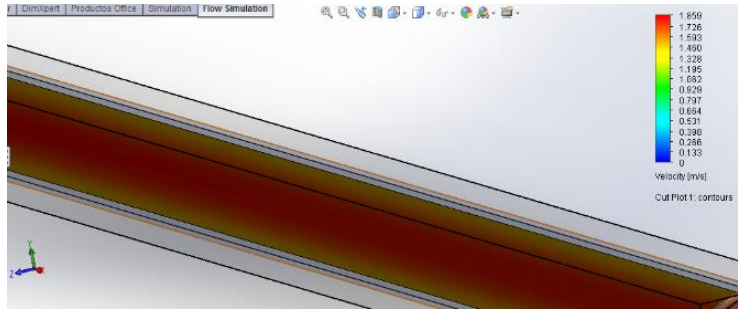
$$\text{Perdidas} = 143.195 \text{ m}$$

$$\text{potencia} = 810.3 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 143.195 \text{ m} * 0.0007 \text{ m}^3/\text{s} = 796.784 \text{ m} \rightarrow 1.0685 \text{ hp} \rightarrow 1.5 \text{ hp}$$

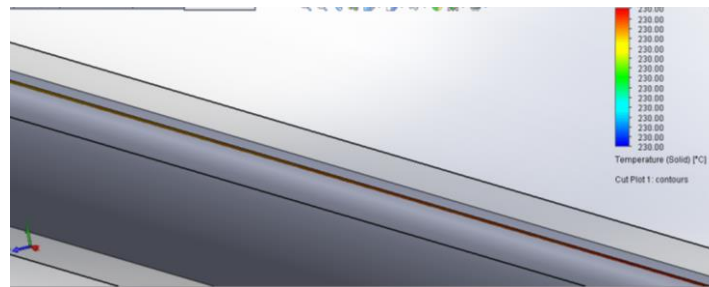
### SIMULACION

La simulación se basa en una analogía que proyecta de los cálculos realizados en la comprobación del intercambio de calor que se mantiene con el serpentín y el molde aplicando un CAD llamado solidworks de modo que sea posible comprobar que el serpentín alcanza una temperatura máxima

que es la que toma como referencia para los cálculos de la transferencia hasta alcanzar el equilibrio térmico.

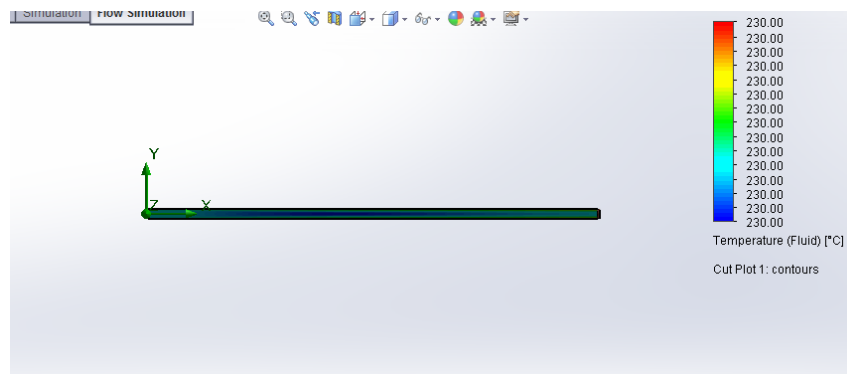


**ILUSTRACIÓN 51 PERFIL DE VELOCIDAD**



**ILUSTRACIÓN 52 TEMPERATURA DE SUPERFICIE**

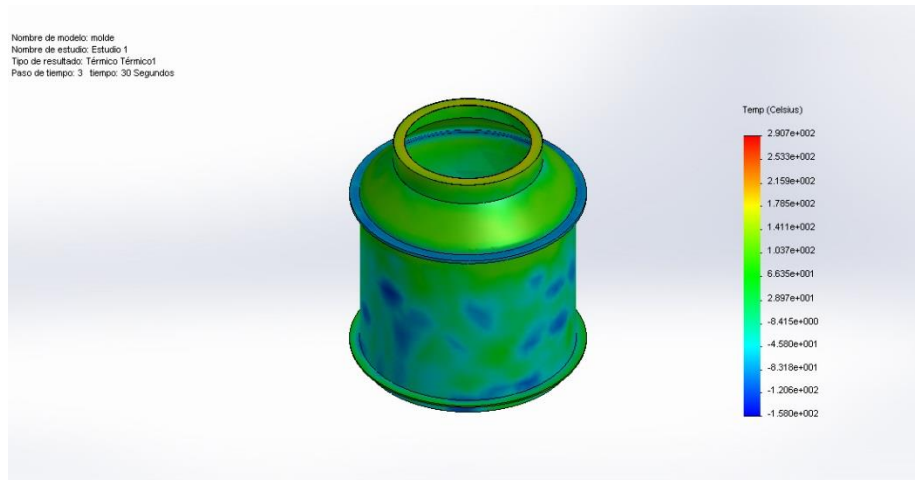
En la analogía se hace notar que la temperatura que alcanza el serpentín es constante en toda su superficie y por tanto junto con los cálculos se demuestra que la cantidad de energía agregada es sobre toda la superficie es constante al igual que rápida ya que la velocidad del fluido se mantiene



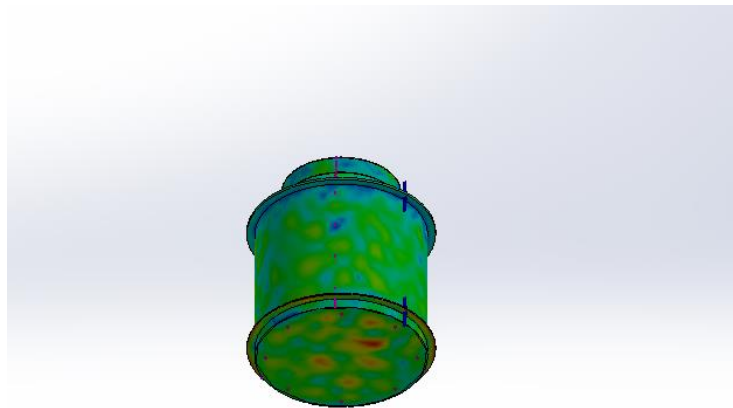
**ILUSTRACIÓN 53 FLUJO DE CALOR**

Una vez que comprueba que el flujo de calor es constante se somete al molde al calor calculado para determinar las temperaturas alcanzadas en un lapso determinado





**ILUSTRACIÓN 54 SIMULACIÓN DE FLUJO DE CALOR MOLDE**



**ILUSTRACIÓN 55 SIMULACIÓN DE FLUJO DE CALOR MOLDE 2**

De acuerdo a los cálculos realizados se maneja una cantidad de flujo de calor que el serpentín distribuye donde fluye el líquido térmico, circula de manera turbulenta como se determinó y se concluye que el sistema cumple con la cantidad de calor distribuida sobre todo el molde para comenzar el proceso aun tomando unos segundos más el método es viable

## CONCLUSIONES

El método de calentamiento en el proceso de rotomoldeo resulta ser muy eficiente, ya que con su sistema que permite tomar la cantidad de calor necesaria en todo momento contenido en su calentador de líquido térmico el que ayudaría a reducir los tiempos en el proceso.

Los cálculos que realiza junto con la simulación que apoya en demostrar que la cantidad de calor que el rotomoldeo exige es cubierta de manera confiable por el calentador de tipo eléctrico que cuenta con su propio sistema de trabajo por lo que lo único en que se toma en cuenta en los cálculos es la cantidad de potencia que esta provee, se demuestra que el tiempo en el que el molde alcanza sus temperaturas de funcionamiento son muy reducidas y son afectadas simplemente en las longitudes de la instalación ya que entre más tiempo le tome al líquido recorrer todas las líneas, este se demorara más en que el calor sea transmitido por el líquido térmico al molde.

De igual manera que el calor es agregado al molde este mismo se retira con un sistema simple y confiable como lo es el intercambiador de calor de tipo radiador el cual las dimensiones de este le permiten desalojar el calor para que se efectúe el desmolde.

Cualquiera de los dos procesos puede realizarse con mayor eficiencia al modificar el caudal del fluido ya que como se vio el flujo turbulento le permiten condiciones de transferencia de calor más efectivas.

Cuando el sistema se mantiene en condiciones óptimas de trabajo en cuestiones de mantener los riegos al mínimo y la limpieza adecuada a la extracción del tinaco puede ser una buena opción para el rotomoldeo ya que como se mencionó se reducen los tiempos de producción mantiene las temperaturas de funcionamiento más estables eliminando variaciones drásticas en la temperatura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

<http://es.slideshare.net/yasmire>

"transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones de YUNUS A. CENGEL, AFSHIN J. GHAJAR" cuarta edición editorial Mc Graw Hill

Catalogo GRUNDFOS un negocio de expansión global bombas recirculadoras

Introducción a la termodinámica capítulo 18 intercambiadores de calor

<http://hdsig.he245.vps.webenabled.net/es/sistemas-de-fluido-termico#sistemas-de-calentamiento-por-aceite-trmico>

[http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp#Darcy-Weisbach\\_\(1875\)](http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp#Darcy-Weisbach_(1875))

<http://heaters.indeeco.com/Asset/Material%20Selection%20Guide.pdf>

<http://www.pirobloc.com/productos/calderas-de-fluido-termico/?gclid=CMulpcXZ3sUCFQqGaQodEGcAkw>