 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

REDISEÑO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LOS MOLDES DE INYECCIÓN DE COLADA CALIENTE PARA UNA PLANTA DEL SECTOR PLÁSTICO

Alejandro Ospina Marín

Carlos Enrique Jaramillo

Ingeniería electromecánica

Adrián Felipe Martínez

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

14/03/2018

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En el proyecto presentado, se propone realizar un rediseño total del sistema de refrigeración de los moldes de colada caliente y fría que se utilizan en el proceso de moldeo por inyección en la empresa MINIPET del sector de plásticos de la ciudad de Medellín, esta empresa dedicada a la fabricación de productos en Polietilentereftalato (PET) y polipropileno (PP) (ambos con distintas propiedades y temperaturas de procesamiento) quiere implementar un sistema que sea eficiente, seguro, limpio y económico, que permita una producción en serie de piezas poliméricas con un mínimo porcentaje de no conformes y excelentes propiedades mecánicas que permitan la durabilidad del material.

Actualmente, se cuenta con sistemas de suministro independientes para cada máquina (chillers y torres de agua) que en total suman una carga térmica de aproximadamente 30 Ton de refrigeración. Para lograr tal rediseño, se estudiará los elementos producidos por la empresa y el sistema (molde y su enfriamiento) que permite su obtención, revisando las propiedades físicas y térmicas del material que se está tratando, temperaturas de procesamiento y desmolde, calcular la cantidad de energía en forma de calor que se debe extraer del molde para lograr un enfriamiento uniforme, el desperdicio mínimo de material y reducir tiempos de solidificación. El cambio en la planta física que realizará la empresa también incluye obtener un nuevo sistema de refrigeración que permita de forma unificada abastecer a las máquinas de inyección que en el momento tienen sistemas de enfriamiento independientes.

Palabras clave: Moldeo por inyección, colada caliente, refrigeración, carga térmica, caudal de agua, tiempo de curado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecimientos a todos aquellos que hicieron posible tan bonita labor de enriquecimiento del conocimiento por medio del trabajo metódico para lograr acciones y avances que sirven a distintos ramales de la sociedad; agradecimiento especial a la empresa MINIPET por facilitar en todo momento las máquinas, moldes, preformas y su planta física para realizar las mediciones y contrastar los resultados, resaltando su disposición y amabilidad a atender cualquier duda que se haya presentado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

PET	Polietilentereftalato
PP	Polipropileno
TNR	Tonelada de refrigeración (Unidad de potencia)
C_v	Contracción volumétrica
C_L	Contracción Lineal
C_p	Calor específico de una sustancia a presión constante
C_v	Calor específico de una sustancia a volumen constante
α	Coefficiente de expansión isobaro,
β	Coefficiente de compresibilidad isoterma,
T_g	Temperatura de transición vítrea
\dot{Q}	Flujo en calor
\dot{m}	Flujo másico
\dot{V}	Flujo volumétrico
σ	Constante de Stefan – Boltzman
ϵ	Factor de emisión para un cuerpo radiante
δ	Densidad

Contenido

Lista de figuras	
Lista de tablas	
1. INTRODUCCIÓN	
2. MARCO TEÓRICO.....	
2.1 Polímeros	
2.2 Propiedades de los polímeros	
2.2.1 Facilidad para trabajar y ser moldeados.....	
2.2.2 Alta impermeabilidad	
2.2.3 Buena estructura aislante.....	
2.2.4 Resistencia a la corrosión	
2.2.5 Bajos costos de producción	
2.2.6 Baja densidad.....	
2.3 Desventajas de los polímeros	
2.3.1 Reciclaje	
2.3.2 Producción elevada de residuos en la fabricación	
2.3.3 Fácil inflamabilidad	
2.4 Métodos y equipos de procesamiento	
2.4.1 Extrusión	
2.4.2 Rotomoldeo	
2.4.3 Termoformado.....	
2.4.4 Inyección.....	
2.5 Reciclaje de plásticos	
2.5.1 Reciclaje mecánico.....	
2.5.2 Reciclaje químico	
2.5.3 Recuperación energética	
2.6 Principales plásticos reciclados.....	
2.7 Proceso de inyección de termoplásticos	
2.8 Partes importantes de la máquina de inyección	
2.8.1 Unidad de inyección	
2.8.2 Unidad de cierre	
2.8.3 Molde.....	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8.4	Ciclo de moldeo por inyección.....
2.8.5	Deformación de la pieza y contracción por enfriamiento
2.8.6	Coloración de la pieza.....
2.8.7	Relaciones termodinámicas a tener en cuenta durante el proceso
2.9	Temperaturas asociadas al proceso de inyección
2.9.1	Temperatura de pseudotransición vítrea
2.10	Refrigeración de los moldes de inyección
2.10.1	Chiller
2.10.2	Carga térmica sobre el sistema de refrigeración.....
2.10.3	Balace térmico sobre el molde
2.10.4	Flujo térmico del polímero inyectado (QAD)
2.10.5	Intercambio térmico con el ambiente (QE).....
2.10.6	Flujo por convección y pérdidas por la apertura del molde (QCo).....
2.10.7	Flujo por conducción (QCond).....
2.10.8	Flujo por radiación (QRad).....
2.10.9	Flujo de calor a eliminar por el refrigerante (QC)
2.10.10	Propiedades térmicas del Polietileno Tereftalato (PET)
3	METODOLOGIA
3.1	Flujos de calor que intervienen en cada una de las máquinas de inyección.....
3.2	Flujo volumétrico de refrigerante a surtir a cada máquina
3.3	Tiempo de curado
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO
	REFERENCIAS
	APÉNDICE

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lista de figuras

Figura 1. Pieza plástica hecha en PET	
Figura 2. Máquina típica extrusora	
Figura 3. Máquina de rotomoldeo	
Figura 4. Máquina inyectora, con sus partes principales	
Figura 5. Partes de la máquina de inyección	
Figura 6. Molde típico de inyección de colada caliente.....	
Figura 7. Molde de inyección abierto, se puede apreciar el sistema de machos y hembras	
Figura 8. Variación de la presión durante el ciclo de moldeo por inyección.....	
Figura 9. Balance térmico sobre el molde.	
Figura 10. Máquina de inyección para preformas de 8,3 g.	
Figura 11. Sistema de machos y cavidades para el molde de 8,3 g.....	
Figura 12. Database de diferentes tipos de chiller ofrecidos por la empresa BEST SINCERE INDUSTRY LIMITED.....	
Figura 13. Chiller de Agua sugerido para satisfacer las necesidades de la empresa MINIPET.	
Figura 14. Máquina de inyección para preformas de 5,4 g.	
Figura 15. Sistema de machos para el molde de 5,4 g de 12 cavidades.....	
Figura 16. Máquina de inyección para preformas de 24 g.	
Figura 17. Sistema de machos y hembras para el molde de 24 g y 24 cavidades.....	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lista de tablas

Tabla 1. Porcentaje de contracción de diferentes plásticos.....

Tabla 2. Temperaturas de transición vítrea de diferentes plásticos

Tabla 3. Diferentes temperaturas asociadas a procesos de un chiller

Tabla 4. Propiedades térmicas del polipropileno.

Tabla 5. Parámetros de cada una de las máquinas inyectoras.....

Tabla 6. Requerimientos de carga térmica.

Tabla 7. Requerimientos de flujo volumétrico.

Tabla 8. Requerimientos generales por máquina.....

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Son muchos los procesos que implican transformación de materiales poliméricos, pues estos representan gran parte de la composición de los objetos que son de uso cotidiano y por el momento son utilizados para fabricar envases, utensilios de cocina, partes de automotores, entre otros usos. Distintos tipos de maquinaria y formas de procesamiento son utilizados para obtener un producto según las necesidades, pues debido a las diferentes estructuras moleculares, cada tipo de polímero requiere métodos y temperaturas de procesamiento para lograr el mayor aprovechamiento y la menor cantidad de pérdidas del material, por lo tanto, existen procesos de inyección, extrusión, rotomoldeo, entre otros, que sirven para obtener diferentes geometrías. Todos estos procesos tienen en común el calor liberado durante el ciclo de transformación, haciendo que el ciclo para el material sea bajo, es entonces donde entra el sistema de refrigeración de la máquina de procesamiento para rechazar el calor excedente y permitir tiempos óptimos de solidificación del plástico. Existen sistemas de refrigeración individuales y centralizados que sirven para abastecer las necesidades de potencia de las máquinas que operan bajo condiciones similares de temperatura y presión, en general las máquinas de inyección utilizan chillers de agua fría para surtir las necesidades de refrigeración de los moldes. En el moldeo por inyección la fabricación de piezas de calidad, con pocos defectos, pérdidas mínimas de material y tiempos bajos de producción son una meta de los productores de plástico en los procesos de obtención del producto final.

La empresa MINIPET elabora objetos en polipropileno y PET (en distintas máquinas de inyección), por motivos de producción y expansión de esta, la empresa realizará un traslado y renovación de la planta física, incluyendo la unificación del sistema de refrigeración de los moldes de las máquinas inyectoras, debido a que actualmente cada máquina tiene un sistema de enfriamiento individual. Buscando disminuir los costos de producción y operación, se evaluará la posibilidad de optar por un sistema centralizado que sea más eficiente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Polímeros

Nombre con el que se denomina a cierto tipo de materiales que se obtienen por medio de procesos de polimerización y cuya estructura macromolecular puede ser moldeada y alterada por medio de calor o presión, estos polímeros son la unión de muchos monómeros que están unidos por el mencionado proceso de polimerización, (Bryce, 2016).

2.2 Propiedades de los polímeros

2.2.1 Facilidad para trabajar y ser moldeados

Debido a la acomodación y elasticidad de sus moléculas, estas pueden deformarse continuamente sin perder las propiedades, ello se logra agregando calor o presión al material en un tratamiento térmico.

2.2.2 Alta impermeabilidad

Estos materiales sirven como impermeables para fluidos y gases, así, logran impedir el paso de cualquier flujo sustancial a través de él, ello determina que el material tenga baja porosidad.

2.2.3 Buena estructura aislante

El plástico y sus derivados se caracterizan por ser muy buenos aislantes de la electricidad, debido a su baja conductividad térmica y eléctrica, esto se explica teniendo en cuenta que un material dieléctrico presenta gran resistencia al desplazamiento de las cargas que lo forman; es importante resaltar que aunque el polímero en sí es un buen aislante térmico y eléctrico, presenta bajos voltajes de ruptura dieléctrica haciendo que el material se incinere con relativa facilidad y temperaturas bajas (Kutz, 2017).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.4 Resistencia a la corrosión

Una propiedad importante de los polímeros es su resistencia al desgaste corrosivo que producen los ataques electroquímicos, por ende, presenta resistencia a muchos factores químicos.

2.2.5 Bajos costos de producción

Los polímeros son materiales bastante abundantes, unos provienen del petróleo y no son degradables, otros son biodegradables, pero todos comparten las características de tener bajos costos de producción y transformación, ellos los hace llamativos para muchos procesos.

2.2.6 Baja densidad

Los polímeros se caracterizan por tener densidades promedio de entre 1 y 1,4 g/cm³, esto ayuda a que las piezas diseñadas con este material cuenten con una facilidad de movilización debido a la baja densidad.



Figura 1. Pieza plástica hecha en PET

Fuente: Empresa MINIPET

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Desventajas de los polímeros

2.3.1 Reciclaje

Los polímeros se caracterizan por su baja capacidad para ser reciclados, en especial los que son derivados del petróleo y sus hidrocarburos, éstos no tienden a degradarse fácilmente y pueden tardar miles de años, además el reciclaje daña las cadenas de polímeros y aumenta el historial térmico, haciéndolo cada vez de menor calidad; para solventar un poco este inconveniente se mezcla una proporción de material reciclado con otro que no lo esté.

2.3.2 Producción elevada de residuos en la fabricación

Un inconveniente que presentan los polímeros es la cantidad de material desperdiciado en el proceso de producción, al perderse material por la solidificación en las diferentes máquinas de procesamiento como es el caso de las máquinas de inyección de colada fría.

2.3.3 Fácil inflamabilidad

Los plásticos tienden a inflamarse muy fácil y a producir residuos volátiles que son tóxicos y nocivos para seres vivos y el ambiente.

2.4 Métodos y equipos de procesamiento

Entre los procesos de transformación de plástico se encuentra el de extrusión, termo formado, moldeo por rotación, extrusoplado, inyección entre otros, a continuación, una breve descripción de estos:

2.4.1 Extrusión

Proceso de obtención de formas plásticas, caracterizadas por una sección transversal constante cuando el material en forma de fluido es succionado o empujado a través de un troquel que le da la forma deseada a la pieza, luego de esto, salen hilos largos del material que se solidifican con agua o aire frío (Giles , Wagner, & Mount , 2014). Para tal proceso se emplea una extrusora que extrae los gránulos del material a trabajar para llevarlos a una tolva que los distribuye en una cámara caliente que contienen husillos encargados de transportar el material hacia el exterior. Se debe contar con una zona de transición de diferentes temperaturas, ya que los polímeros no trabajan todos a la misma temperatura,

y controlar el tiempo de enfriamiento de los cilindros; la figura 5 muestra una máquina utilizada para el proceso de extrusión.

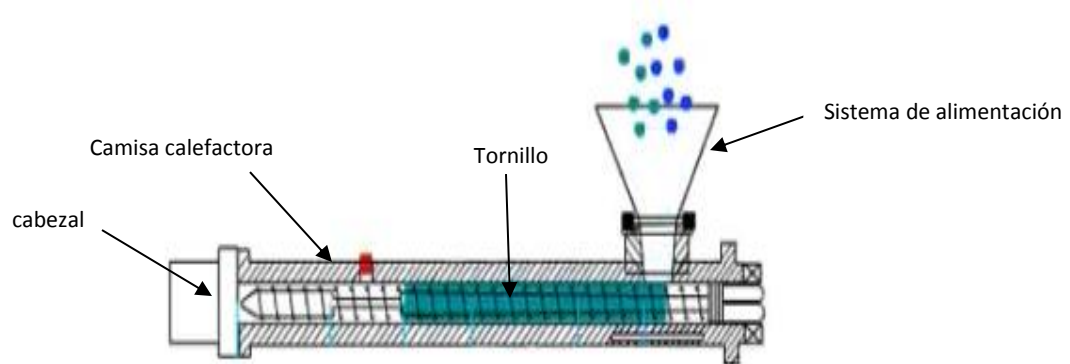


Figura 2. Máquina típica extrusora

Fuente: (Kutateladze, 1963)

2.4.2 Rotomoldeo

Proceso de producción de piezas plásticas y huecas por medio de la rotación de un molde en dos ejes perpendiculares para dar esa forma deseada, para ello, el polímero se introduce en polvo o líquido al molde, luego éste molde se introduce en un horno con una temperatura típica de 250-450°C donde comienza a girar y adherirse a las paredes del material. Se debe controlar la porosidad de las piezas, las velocidades de rotación, enfriamiento y calentamiento; la figura 3 muestra una máquina de rotomoldeo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 3. Máquina de rotomoldeo

Fuente: (landau, 2004)

2.4.3 Termoformado

Consiste en calentar una lámina de un material termoplástico de modo que pueda adaptarse a un molde por la acción de la presión de vacío o por medio de un contra molde, las temperaturas promedio de trabajo están entre 120 y 180°C. Los parámetros a controlar son las temperaturas de conformado y calentamiento, el tiempo de enfriamiento y la presión de vacío.

2.4.4 Inyección

Proceso semi-continuo que consiste en inyectar un polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño; en el molde el material toma forma y se solidifica, para finalizar se enfría el molde, se abre y se extrae la pieza moldeada, es muy común inyectar plástico para lograr otras formas que no son posibles por otros métodos. Son críticas las variables de temperatura de moldeo y de desmolde y el tiempo de solidificación. La figura cinco muestra las principales partes de la máquina de

inyección típica, tornillo, tolva, molde, cilindro, motor y sistema de refrigeración hidráulico.

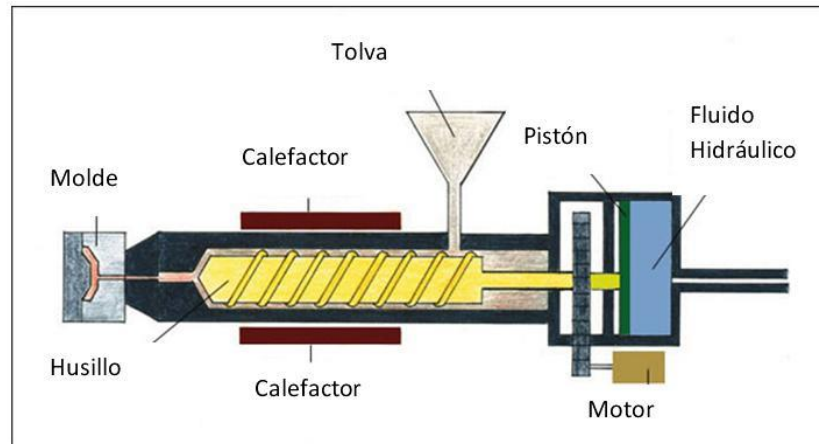


Figura 4. Máquina inyectora, con sus partes principales

Fuente: (Incropera, Dewitt , Bergman , & Lavine , 2006)

2.5 Reciclaje de plásticos

Proceso por el cual se recupera los desechos de plásticos que ya habían sido tratados anteriormente de forma térmica, entre sus principales usos se encuentra la producción de nuevas piezas, utilización como combustible o para fabricar otros productos químicos. Entre los procesos de reciclado de plástico se encuentra:

2.5.1 Reciclaje mecánico

Consiste en lavar bien los residuos de plásticos, triturarlos y volverlos grano, para volver a ser fundidos luego en moldes.

2.5.2 Reciclaje químico

Proceso que consiste en un tratamiento de calor realizado al material con el fin de volver a formar moléculas simples dentro de éste.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.3 Recuperación energética

Método que consiste en convertir el plástico en una forma de fuente de energía de combustible, dicho proceso conlleva a aumentar la cantidad de reorganizaciones moleculares del material y degrada esas cadenas moleculares, por tanto, libera muchos agentes químicos y tóxicos que van en contravía de un ambiente sano.

Algunos de los usos de los plásticos reutilizados tienen relación con la industria de piezas industriales, botellas, tuberías, láminas, bolsas, etc.

La cantidad de plásticos reciclados ha aumentado cada año. Se estima que los residuos de plástico de Estados Unidos en 2008 fueron de 33,6 millones de toneladas, de las cuales 2,2 millones de toneladas fueron reciclados, 2,6 millones fueron quemadas para producir energía y 28,9 millones de toneladas, fueron a parar a vertederos (Groover, 2014).

2.6 Principales plásticos reciclados

- Polipropileno (PP)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Poliestireno sólido (PS) y expandido (PS-E)
- Polietileno tereftalato (PET)
- Poliuretano (PUR)

2.7 Proceso de inyección de termoplásticos

La inyección es un proceso continuo para obtener piezas con formas geométricas complejas, un material polimérico fundido se inyecta por una compuerta de entrada en unas cavidades ya dimensionadas dentro de un molde que está cerrado y frío con el fin de que el polímero empiece a perder calor luego de tomar la forma que éste le da, luego de esto, el polímero se libera de su molde a una temperatura en la que se mantiene sólido, básicamente, el polímero se mantiene en su forma tridimensional en todo el proceso, lo que permite que se formen cristales y se fortalezca su estructura. La facilidad y utilidad de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

este método se ve reflejada en las piezas que pueden obtenerse, los costos bajos de fabricación y la posibilidad de obtener gran cantidad de piezas en serie.

En el proceso, el polímero en forma de gránulos ingresa a una tolva encargada de distribuir el material a la entrada (boquilla) de la máquina inyectora denominada zona de alimentación, allí entra a un barril que contiene un pistón móvil y en el cual la temperatura varía progresivamente (260-314 °C) conforme el fluido avanza hacia la compuerta (zona de dosificación).

2.8 Partes importantes de la máquina de inyección

2.8.1 Unidad de inyección

Es el conjunto de piezas conformadas por el cilindro y los diferentes husillos que contenga la máquina, su función principal es la de mezclar, fundir e inyectar el polímero, es aquí donde se debe tener en cuenta las condiciones termodinámicas del plástico a trabajar para poder definir parámetros como longitud, diámetro del tornillo y de su raíz, relación de diámetro – largo (D/L), paso entre las hélices y velocidades de rotación y traslación del husillo; estas cantidades se pueden calcular conociendo la capacidad calorífica del polímero y su calor latente de fusión, las temperaturas de procesamiento.

El proceso de calentamiento del polímero se da por medio de resistencias eléctricas que se encuentran en la cámara de la máquina, este calor agregado no es suficiente para lograr una fusión homogénea debido a la baja conductividad térmica de los polímeros, se necesita entonces agregar más calor al sistema para agitar más las moléculas del material, es entonces donde entra la importancia del husillo, pues este transporta el polímero agregándole fricción y realizando trabajo sobre éste, además cuenta con unos canales que tienen una profundidad que aumenta desde la zona de entrada hasta la zona de dosificación con el fin de aumentar continuamente la presión; Las máquinas que no disponen de husillos no presentan una eficiencia tan alta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8.2 Unidad de cierre

Consiste de una prensa hidráulica o mecánica encargada de contener el polímero fundido dentro del molde, para ello debe ejercer una fuerza tal que sea capaz de mantener el polímero embebido en la cavidad sin que este se escape por las juntas del molde, para diseñar correctamente una unidad de cierre, se debe tener en cuenta la fuerza aplicada en unidad de área de las placas, la separación de las mismas y la eficiencia en el momento de expulsión del polímero.

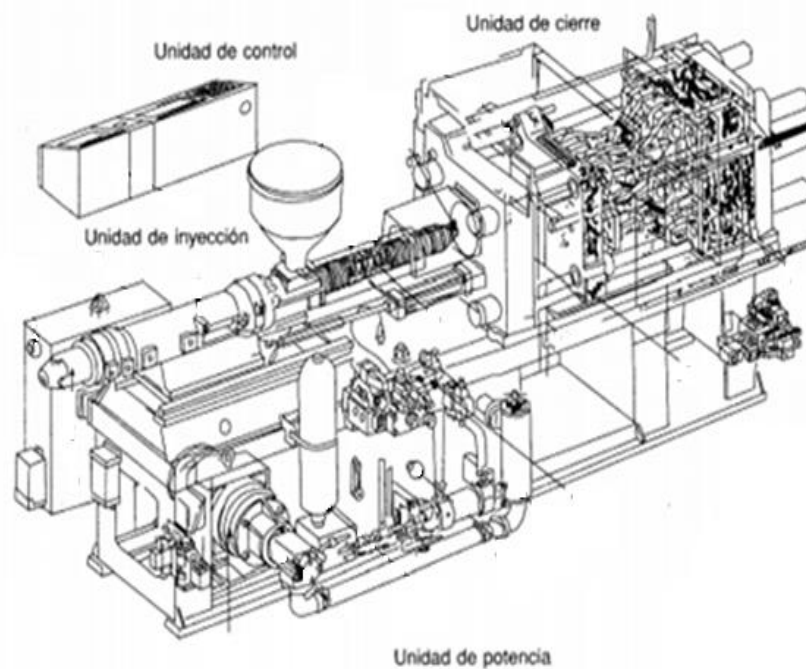


Figura 5. Partes de la máquina de inyección

Fuente: (Rees, 1994)

2.8.3 Molde

Objeto construido a partir de acero de alta resistencia a la presión y a las fuerzas de cohesión, en el caso de moldes de colada caliente, la temperatura de la pared deberá estar un poco por debajo de la temperatura ambiente (alrededor de 18-20 °C), estos se fabrican teniendo en cuenta el desempeño del metal en ensayos de tensión, deformación,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

flexión y demás ensayos mecánicos, además de tener en cuenta parámetros de transferencia de calor, para lograr una conducción libre.



Figura 6. Molde típico de inyección de colada caliente

Fuente: Empresa MINIPET

Los moldes tienen un sistema de canales conocido como colada que se encuentra en un manifold (colector) encargado de distribuir el material en estado líquido, es por medio de esta que transita el polímero hacia las cavidades, existen moldes de colada caliente y de colada fría y la diferencia radica en la cantidad de material que se pierde solidificado fuera de la cavidad que da la forma geométrica al plástico; en un molde de colada fría, el polímero no se mantiene caliente durante el tránsito por ésta, ello conlleva a que material que no tiene la forma de la cavidad, se solidifique y se “pierda en el proceso”, en cambio en los moldes de colada caliente, ésta se mantiene siempre a una alta temperatura y así el polímero estará siempre en forma líquida y podrá ser utilizado en su totalidad para ser

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

moldeado, la ventaja de los moldes de colada caliente radica en la disminución total de material que se solidifica y que luego es reutilizado (recordemos que el plástico cuando se recicla aumenta su historial térmico y su calidad disminuye)

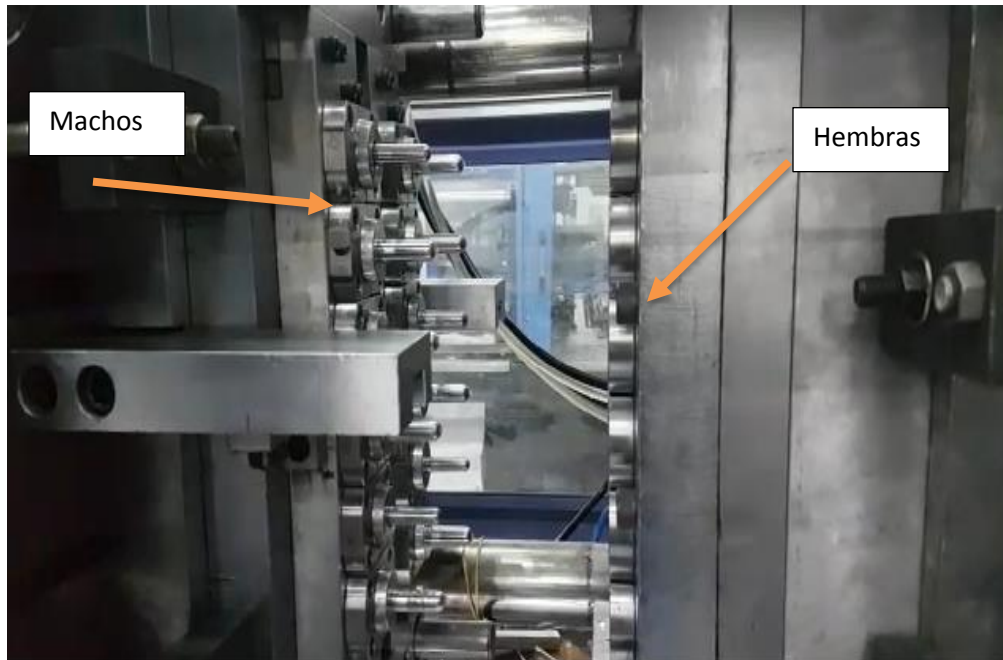


Figura 7. Molde de inyección abierto, se puede apreciar el sistema de machos y hembras

Fuente: Empresa MINIPET.

2.8.4 Ciclo de moldeo por inyección

A continuación, se describe los componentes del ciclo de inyección.

Inicialmente, el molde se encuentra cerrado y vacío, la unidad de inyección carga material fundido listo para transportar, en esta fase el polímero pasa de la temperatura a la que se encuentra en la boquilla a la temperatura de inyección, lista para entrar al molde.

Se abre la válvula de admisión en la compuerta y el tornillo haciendo las veces de pistón hace pasar a través de esta el polímero fundido y con dirección a las cavidades, el polímero está en su temperatura de moldeo.

El pistón luego del avance se mantiene sostenido un instante con el fin de lograr que la presión sea constante, pues si la presión varía, también lo harán las dimensiones de las piezas que se contraerán en el momento de enfriarse.

Se elimina la presión, el husillo retrocede girando para cargar más material

La pieza ya moldeada termina de enfriarse y la prensa libera la presión para que el molde se abra y la pieza sea expulsada a una temperatura denominada temperatura de desmolde. La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo se reinicia (Rosato, Rosato, & Rosato, 2004). La siguiente figura representa el diagrama de ciclo de inyección para un termoplástico.

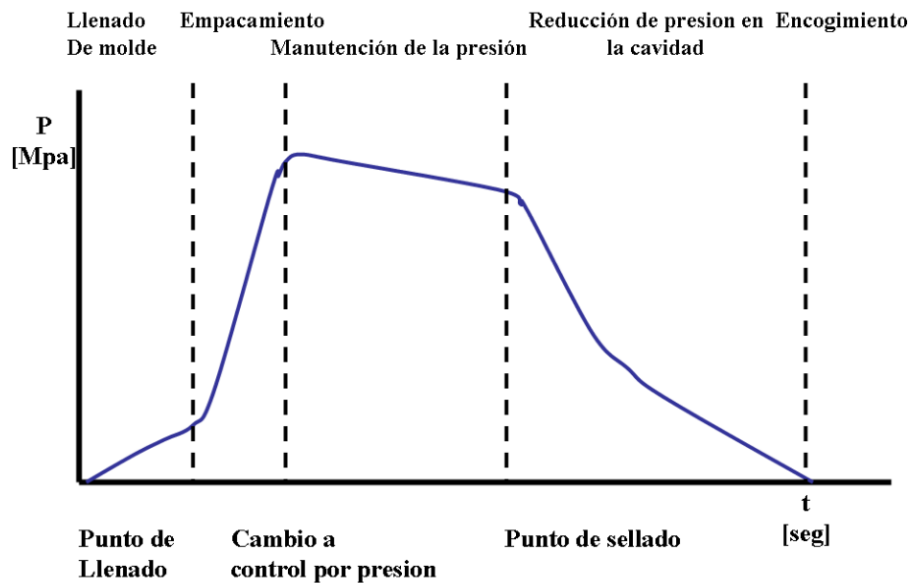


Figura 8. Variación de la presión durante el ciclo de moldeo por inyección

Fuente: (Berins, 1991)

La anterior imagen muestra el cambio que experimenta la presión en el proceso de llenado del molde en el proceso de inyección y la proporción de tiempo de la misma, se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

puede entonces apreciar que luego de que el pistón transporta el material a la compuerta del molde y realiza el llenado del mismo se alcanza la máxima presión con el fin de lograr que el material se adhiera a las paredes de las cavidades del molde y no haya imperfecciones en cuanto a la uniformidad de material debido a un “encogimiento” temprano del plástico; luego se empieza a disminuir la presión de forma que se pueda lograr un porcentaje de contracción deseado y se pueda sellar el material en su volumen final.

2.8.5 Deformación de la pieza y contracción por enfriamiento

Al variar la temperatura también lo hace la densidad del polímero, de acuerdo a la relación de expansión o contracción de propiedades métricas a causa de variaciones de la temperatura en un cuerpo, se verán afectadas las medidas de superficie, longitud y volumen al calentar el plástico o enfriarlo, dicho porcentaje de contracción depende del polímero a tratar y se puede calcular en general como la proporción entre la medida métrica de la parte moldeada y la medida de la cavidad, así para la contracción de volumen se tiene la siguiente relación:

$$C_V = \frac{V_c - V_{mp}}{V_c}$$

Donde

C_V : Representa la contracción volumétrica

V_c : Es el volumen de la cavidad

V_{mp} : El volumen de la parte moldeada

De la misma manera, se puede calcular la contracción lineal:

$$C_L = \frac{L_c - L_{mp}}{L_c}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde

C_L : Representa la contracción lineal

L_c : Es la longitud de la cavidad

L_{mp} : Es la longitud de la parte moldeada.

También se tiene la siguiente relación para las dos contracciones:

$$C_V \approx 3C_L$$

Los polímeros disminuirán en su tamaño dependiendo de la temperatura a la que se formen los cristales por lo que la temperatura del molde y de enfriamiento deben de estar muy controladas para lograr un producto de buena calidad.

La siguiente tabla representa el porcentaje de contracción para distintos polímeros

Termoplástico	Contracción (%)
ABS	0,4 a 0,8
Poliacetal	0,2 a 0,7
Poliestireno	0,4 a 0,7
Polipropileno	1,3 a 1,6
Polietileno de baja densidad	4 a 4,5

Tabla 1. Porcentaje de contracción de diferentes plásticos

Fuente: (Rubin, 1972)

2.8.6 Coloración de la pieza

Este proceso, permite obtener piezas de diferente percepción estética y con diferentes propiedades ópticas, los colorantes que proporcionan color a los polímeros pueden ser tintes solubles o pigmentos finamente divididos. Los primeros son solubles en el polímero

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

incorporándose a su estructura molecular y se utilizan para colorear plásticos transparentes; Los pigmentos son como material de relleno que no se disuelven, sino que permanecen como fases separadas; generalmente son partículas de pequeño tamaño, transparentes y con índice de refracción próximo al polímero base. Otros aditivos dan opacidad y color al polímero.

2.8.7 Relaciones termodinámicas a tener en cuenta durante el proceso

Para obtener la mayor eficiencia en el proceso de inyección, se debe tener estimados parámetros termodinámicos para poder dar un tratamiento al proceso, es importante conocer las relaciones de presión, temperatura y volumen, ya que todas estas están variando durante la inyección, así para conocer estos parámetros se tienen los coeficientes para compresibilidad y expansión isotérmicos basados en la ecuación de Flory:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

Donde

α Es el coeficiente de expansión térmica y representa el cambio en el volumen o en la longitud de un cuerpo que experimenta un gradiente de temperatura manteniendo la presión constante, pues normalmente los sólidos se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse.

El coeficiente de compresibilidad isotérmica representa la resistencia que tiene un cuerpo a una compresión uniforme isotérmica cuando el volumen disminuye y la presión aumenta, se define así:

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.9 Temperaturas asociadas al proceso de inyección

2.9.1 Temperatura de pseudotransición vítrea

Esta temperatura se da solo en polímeros y sólidos amorfos, termodinámicamente hablando, es la temperatura a la que el plástico disminuye su densidad, dureza y rigidez, es el punto intermedio entre tener un material sólido y uno líquido, se denota con T_g ; cuando se supera esta temperatura, los enlaces en el polímero son más débiles que el movimiento térmico de las moléculas logrando una mayor elasticidad y de deformación sin ruptura. A continuación, se presenta las temperaturas de pseudotransición vítrea más comunes en polímeros.

Polímero	T_g (°C)
ABS	110
Poliacetal	-85
Poliestireno	100
Polipropileno	-15 a 25
PEAD	-35 a 120

Tabla 2. Temperaturas de transición vítrea de diferentes plásticos

Fuente: (Berins, 1991)

Cada polímero tiene diferente temperatura de procesamiento y se ve determinada por las condiciones que tenga el producto en cuanto a su peso molecular, ramificación de las cadenas de polímeros, aditivos agregados y demás, es por eso que se debe contar con una ficha técnica de especificaciones del polímero según el proveedor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.10 Refrigeración de los moldes de inyección

La refrigeración del molde de inyección está estrechamente relacionada con la eficiencia del ciclo y el tiempo del mismo, es vital generar una disminución homogénea de la temperatura para que el plástico pueda solidificarse sin imperfecciones de superficie. Se busca entonces llevar al mínimo período el ciclo de moldeo sin dañar el tratamiento térmico realizado al material anteriormente, pues el molde intercambia calor con el refrigerante o con agua que proviene de un chiller o una torre encargada de rechazar el calor generado en el molde.

A continuación, se da una breve descripción de los sistemas de refrigeración usuales

2.10.1 Chiller

Máquina frigorífica encargada de refrigerar un medio líquido como agua o también para enfriar aire, se utiliza en grandes instalaciones o en procesos de máquinas de producción masiva debido a la gran capacidad que tiene para enfriar el agua. Su funcionamiento es basado en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, así que tiene componentes como compresores, evaporadores, condensadores, entre otros. Estos enfriadores presentan distintas capacidades de refrigeración de entre 2-250 TNR (Páramo & Guarín , 2002); entre sus condiciones de operación debe tener un espacio ventilado, un medio en el que se pueda descargar el calor fuera de las instalaciones o sistema de ventilación, un sistema de drenaje y de surtido de agua. A continuación, se muestra una tabla con los rangos de temperaturas requeridas en distintos procesos de enfriamiento:

Proceso	Rango (C°)
Moldes	7 a 14
Enfriadores de aceite	23 a 35
Compresores de aire	23 a 35
Post enfriadores	20 a 30

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Molinos	23 a 35
Termorreguladores	7 a 15
Aire para termo formadoras	7 a 10

Tabla 3. Diferentes temperaturas asociadas a procesos de un chiller

Fuente: (Groover, 2014)

En el momento de seleccionar el sistema de refrigeración adecuado, se debe tener en cuenta las variables del proceso de producción, tales como la capacidad de producción, costos de operación, precisión, costos de inversión y capacidad de enfriamiento requerida.

Entre las ventajas de los enfriadores de agua está la alta capacidad de refrigeración, en contra parte, los costos de mantenimiento son elevados y los requerimientos en cuanto a aparatos que permiten su funcionamiento como bombas y compresores también son de muy alto costo; cabe resaltar la refrigeración que se le debe suministrar a las diferentes partes de la maquinaria que no van ligados al sistema de los moldes, en estos casos se deben adaptar sistemas de refrigeración para tal motivo y garantizar una temperatura adecuada en el momento de la operación.

Varios factores intervienen al momento de establecer la carga térmica y el caudal de agua, como el material del que se encuentra hecho el molde, temperatura de trabajo en la colada (por lo general en el proceso del PET se trabaja con temperaturas entre 250 y 290 °C) y la temperatura a la que se debe enfriar el material con el agua del chiller (el enfriamiento del PET y el PP se da entre los 12 y 22 °C) (Duleba & Greskovic, 2015). Cuando el proceso de enfriamiento se realiza con agua, ésta se encuentra levemente por debajo de la temperatura ambiente, para no afectar un parámetro denominado tiempo de enfriamiento y que se corresponde con el tiempo que pasa el plástico desde la fase de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

llenado en la que se dirige a las cavidades, hasta su eyección del molde, es decir, el tiempo de enfriamiento (también denominado tiempo de curado) representa la fase en la que se debe extraer más calor del sistema y ocupa las etapas de llenado y compactación, una expresión analítica del tiempo enfriamiento se obtiene al solucionar la ecuación de difusión de calor que se reduce a la ecuación de Fourier para la conducción de calor unidimensional en un sistema que no es autónomo y del cual se conoce su difusividad térmica α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p \text{ material}}$$

Donde los parámetros para calcular el tiempo de curado y que son las condiciones iniciales y de contorno de la ecuación parcial de Fourier, son la temperaturas de inyección $T_{\text{inyección}}$, que corresponde a la temperatura que tiene el polímero en el momento de llenado, temperatura de la pared de la cavidad T_{pared} , cuyo valor es la temperatura a la que se encuentra la pared de la cavidad del molde, temperatura de desmolde T_{desmolde} , que corresponde a la temperatura justo en el momento de eyección y el espesor de la pieza que se desea obtener s ; además α corresponde a la difusividad térmica efectiva que depende de cada material, $C_p \text{ material}$ el calor específico y ρ la densidad del material plástico. El tiempo de curado sigue la siguiente expresión: la solución semi-analítica se pueden encontrar en las referencias (Zarkadas & Xanthos, 2003) (Stelson, 2003)

En la siguiente fórmula se puede hallar el tiempo de enfriamiento; teniendo en cuenta la temperatura promedio.

$$t_{\text{enfriamiento}} = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{8(T_{\text{inyección}} - T_{\text{pared}})}{\pi^2 (T_{\text{desmolde}} - T_{\text{pared}})} \right) \quad (1)$$

En la siguiente fórmula se puede hallar el tiempo de enfriamiento; teniendo en cuenta la temperatura de medio plano o del centro de la pared.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$t_{enfriamiento} = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \operatorname{Ln} \left(\frac{4(T_{inyección} - T_{pared})}{\pi(T_{desmolde} - T_{pared})} \right) \quad (2)$$

Se selecciona la ecuación la ecuación (2) ya que el valor que arroja corresponde aproximadamente al 80 – 85 % del tiempo total del ciclo (Williams, 2018).

Si se estipula el tiempo de enfriamiento deseado del polímero, se puede entonces conocer la temperatura a la que se deberá encontrar la pared de la cavidad, despejando la variable deseada de la ecuación

$$T_{pared} = \frac{T_{inyección} - \left(\frac{\pi}{4} e^{\frac{t_{enfriamiento} \pi^2 \alpha}{s^2}} \right) T_{desmolde}}{1 - \frac{\pi}{4} e^{\frac{t_{enfriamiento} \pi^2 \alpha}{s^2}}}$$

Con las anteriores temperaturas y conociendo el flujo de masa del material a refrigerar, se puede calcular el caudal de agua o de refrigerante (deducción analítica en la referencia Carslaw, Jaeger, 1959) que deberá surtir los moldes para lograr que el plástico sea eyectado un poco debajo de la temperatura ambiente:

$$\dot{V} = \frac{C_{p \text{ material}} (T_{inyección} - T_{demolde}) \dot{m}_{material}}{C_{p \text{ refrigerante}} \Delta T_{refrigerante} \delta_{refrigerante}}$$

\dot{m} Representa la cantidad de material que fluye por unidad de tiempo y se conoce como flujo másico, $C_{p \text{ refrigerante}}$ es la capacidad calorífica del refrigerante y en caso de refrigerar con agua, pues es el calor específico de ésta, $\Delta T_{refrigerante}$ es el cambio en la temperatura que experimenta el refrigerante al pasar a través del circuito del chiller y que tiene un valor cercano a 1,5 °C, por último, $\delta_{refrigerante}$ es la densidad del refrigerante.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.10.2 Carga térmica sobre el sistema de refrigeración

Las variables críticas a tener en cuenta son, la temperatura de inyección, de desmolde y la temperatura a la que se encuentra la pared de la cavidad, de ello depende el calor que se debe de rechazar para lograr que el material se enfríe sin formar defectos, conocidas estas cantidades para cada uno de los materiales que se inyectan, se puede proceder a calcular el calor que se debe de extraer para disminuir el tiempo de producción, también se debe de tener en cuenta la humedad relativa del ambiente porque esta determina la facilidad para rechazar el calor al ambiente, en caso de humedades muy altas debe de utilizarse sistema de ventilación para que el aire circundante a las máquinas esté más seco (Eras López, 2015).

El calor tiene distintas formas de transmisión como energía según la posibilidad de intercambio que presente el medio material, este puede pasar a otros cuerpos por conducción, convección y radiación; las paredes del molde de inyección son de metal y tienen una alta conductividad térmica, el calor se transmite a las paredes por medio de resistencias eléctricas que calientan el material por el efecto Joule, además se libera calor de la máquina misma hacia el ambiente, aumentando la temperatura del aire circundante y disminuyendo la eficiencia de la máquina.

2.10.3 Balance térmico sobre el molde

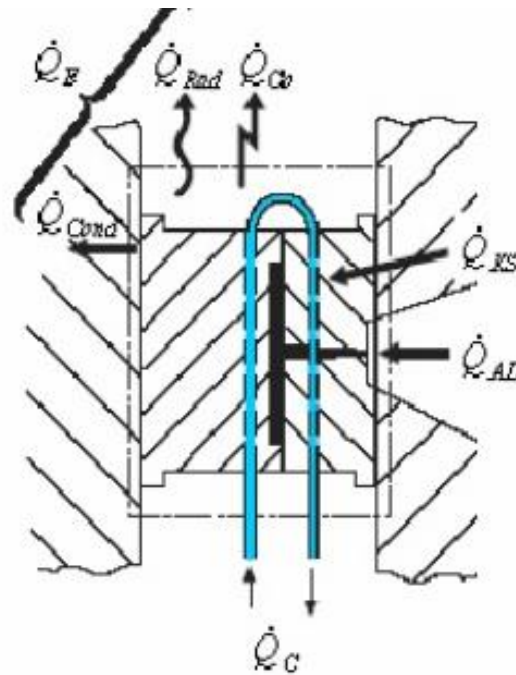


Figura 9. Balance térmico sobre el molde.

Fuente: (Eras López, 2015)

El balance térmico establece que el calor entregado al molde debe de ser igual al rechazado; se debe garantizar que la cantidad de calor que debe ser eliminado del molde mediante el sistema de refrigeración para el tiempo de un ciclo, es el equivalente al calor aportado por el polímero mismo y por los flujos de energía por convección, conducción y radiación que son intercambiados como flujos al ambiente en forma bidireccional, también se debe incluir el calor de las resistencias o calentadores. El calor que ingresa al molde se considera positivo y el calor que es eliminado del molde se considera negativo, utilizaremos la siguiente fórmula para el balance de energía térmica.

$$\dot{Q}_{AD} + \dot{Q}_{KS} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_E$$

Se establece la cantidad de energía calorífica a extraer del molde durante el proceso de inyección a través de la suma individual de los diferentes flujos de calor que intervienen en el proceso, estos son:

Flujo térmico del polímero inyectado ($\dot{Q}_{polímero}$) (\dot{Q}_{AD})

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Flujos por conducción ($\dot{Q}_{\text{conducción}}$) (\dot{Q}_{Cond})

Flujos por convección al ambiente ($\dot{Q}_{\text{convección}}$) (\dot{Q}_{Co})

Flujos por radiación al ambiente ($\dot{Q}_{\text{radiación}}$) (\dot{Q}_{Rad})

Flujo de calor aportado por la cámara caliente del molde (\dot{Q}_{camara}) (\dot{Q}_{KS})

Flujo total de calor extraído por el sistema de refrigeración (\dot{Q}_{total}) (\dot{Q}_{C})

2.10.4 Flujo térmico del polímero inyectado (\dot{Q}_{AD})

Este flujo de calor se corresponde con el aportado por el polímero en la inyección, ya que este tiene una capacidad calorífica, está relacionado con el cambio de entalpía específica que sufre una sustancia cuando es sometida a un calentamiento isobárico, en su forma diferencial representa la relación entre el calor específico y las temperaturas de inyección y desmolde (durante el tiempo de solidificación) y es proporcional al calor específico del material, \dot{m} es el flujo másico de plástico.

$$\dot{Q}_{\text{AD}} = \dot{m}C_p\Delta T = \dot{m}C_p(T_{\text{inyección}} - T_{\text{desmolde}})$$

2.10.5 Intercambio térmico con el ambiente (\dot{Q}_{E})

La transferencia de calor entre el molde y el ambiente se emite de tres maneras distintas: conducción, convección y radiación

$$\dot{Q}_{\text{E}} = \dot{Q}_{\text{Co}} + \dot{Q}_{\text{Cond}} + \dot{Q}_{\text{Rad}}$$

2.10.6 Flujo por convección y pérdidas por la apertura del molde (\dot{Q}_{Co})

Cuando se abre el molde para liberar las piezas, este cede calor al medio por medio de convección, dicho calor puede calcularse de la siguiente forma, en la que el cambio de temperatura es proporcional al coeficiente de convección, el área de convección y el tiempo que dura dicho proceso:

$$\dot{Q}_{\text{apertura}} = A_s\alpha_L(T_{\text{molde}} - T_{\text{ambiente}}) \left(\frac{t_{\text{apertura}}}{t_{\text{ciclo}}} \right)$$

Donde

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A_s es el área de superficie del molde, α el coeficiente de convección del aire ($\alpha = 8 \text{ w/m}^2\text{°C}$ (Boyard, 2016)), A_{TR} es la superficie de partición de las dos placas y se considera como el plano que se genera al abrir el molde en 2 partes y contiene a la línea de partición del molde, $t_{apertura}$ es el tiempo que el molde permanece abierto; luego el calor total por convección es:

$$\dot{Q}_{Co} = \alpha_L(T_{molde} - T_{ambiente}) \left(A_s + \frac{A_{TR}t_{apertura}}{t_{ciclo}} \right)$$

2.10.7 Flujo por conducción (\dot{Q}_{Cond})

Este se da por conducción a través de las paredes del material y depende de su estructura cristalina, por ello se establece este flujo conductivo entre el molde y las placas, dependerá tanto de su área de conducción A_c y de las temperaturas del molde y el ambiente

$$\dot{Q}_{cond} = A_c\beta(T_{molde} - T_{ambiente})$$

Para el acero $\beta=98 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Boyard, 2016) es el coeficiente de transmisión.

2.10.8 Flujo por radiación (\dot{Q}_{Rad})

Los flujos de calor por radiación siguen la ley de Stefan – Boltzman y se dan por la relación existente entre la temperatura absoluta y la longitud de onda electromagnética para un cuerpo emisor y que está descrito de forma correcta por la ley de Planck, este flujo de calor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, y al área de radiación.

$$\dot{Q}_{Rad} = A_r\sigma\varepsilon \left(\left(\frac{T_{molde}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ambiente}}{100} \right)^4 \right)$$

Donde A_r es la superficie de radiación, ε el factor de emisión del material (para el acero, $\varepsilon = 0.25 - 0.8$ (Boyard, 2016)) y $\sigma=5,67*10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^4$ la constante de Stefan-Boltzman.

2.10.9 Flujo de calor a eliminar por el refrigerante (\dot{Q}_C)

Éste se puede obtener a partir de la ecuación establecida en el balance térmico del molde

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{AD} + \dot{Q}_{KS} - \dot{Q}_E$$

Siendo conocidos el calor aportado por el material y el calor disipado hacia el ambiente, menospreciamos el calor aportado por la cámara caliente.

2.10.10 Propiedades térmicas del Polietileno Tereftalato (PET)

Propiedad	Sistema internacional	Otras unidades
Calor específico	$1,5 - 2 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$	$0,36 - 0,48 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$
Coeficiente de expansión térmica	$(100 - 180) \frac{10^6}{\text{K}}$	$(100 - 180) \frac{10^6}{^\circ\text{C}}$
Conductividad térmica a 23°C	$(0,15 - 0,24) \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$(0,001 - 0,0022) \frac{\text{W}}{\text{cm}^\circ\text{C}}$
Temperatura máxima de utilización	360,13 – 373,13 K	90 – 100 °C
Temperatura mínima de utilización	210,13 – 263 K	-60 – -10 °C
Difusividad térmica efectiva	$0,076 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	
Densidad	1380 Kg/m ³	1,38 g/cm ³

Tabla 4. Propiedades térmicas del polipropileno.

Fuente: Rubin, 1972

3 METODOLOGIA

Para comenzar se utilizaron los conceptos introducidos en el marco teórico sobre flujo de calor para calcular la carga térmica del sistema de refrigeración. Para esto se debe tener en cuenta el peso total de la inyección y el calor específico del material a procesar en cada uno de los diferentes moldes, se deben tomar las temperaturas de inyección del material,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la cual se encuentra instrumentada en la máquina y las temperaturas de desmoldeo de las piezas que se obtiene en el proceso mediante un termómetro infrarrojo el cual permitió realizar esta actividad de una manera más versátil y rápida; posteriormente se toman las medidas para hallar las áreas de los diferentes moldes con el fin de calcular el área de la carga térmica y poder calcular matemáticamente el calor a extraer del polímero por el refrigerante, dichas actividades se realizaron durante tres semanas y en los tres turnos en las que operan las máquinas de inyección para obtener datos confiables, el mismo procedimiento se realizó en cada una de las diferentes maquinas luego se tabularon los valores establecidos para su posterior análisis. Seguido de esto, se calcula el flujo volumétrico de agua (refrigerante) que deberá surtirse a cada máquina para lograr un rechazo eficiente del calor generado y una solidificación compacta que permita obtener las piezas del espesor deseado. Para finalizar se calcula el tiempo de curado que debe de tener cada pieza plástica para lograr que se genere la menor proporción de contracción en el momento de llenado y compactación del plástico.

El número de cavidades indica la cantidad de orificios en los que será distribuido el plástico fundido y que se traduce en el número de piezas que se obtiene por desmoldada, para cada máquina el valor es diferente. Cada una de las máquinas tiene establecido por necesidades de producción un flujo másico que está dado en la tabla 5.

A continuación, se muestra los parámetros para el ciclo de inyección de cada una de las tres máquinas inyectoras de colada caliente y cuyo material de trabajo es el PET, a continuación, se explica con detalle los parámetros en cada una de ellas, todos estos parámetros son designados por la empresa y deben ajustarse a los cálculos.

Máquina	Masa de los envases (g)	Tiempo de ciclo (s)	Número de cavidades	Flujo másico (Kg/h)	Piezas producidas por hora
1	8,3	16	16	29,8	3600
2	5,4	15	12	21,2	3927
3	24	19	24	109	4547

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 5. Parámetros de cada una de las máquinas inyectoras.

Fuente: Elaboración propia

Se puede entonces calcular el calor extraído de cada máquina, teniendo en cuenta la transmisión del calor en formas de convección, conducción y radiación total mencionadas anteriormente; la temperatura de inyección para el PET es de 260 °C, temperatura de desmolde de 45 °C, y la temperatura de la pared de 19°C, la temperatura del ambiente se establece en 23 °C ya que esta es la temperatura promedio en la planta de producción.

3.1 Flujos de calor que intervienen en cada una de las máquinas de inyección

Para cada una de las máquinas se tiene los siguientes parámetros, los moldes tienen iguales áreas superficiales, lo único que varía es el número de cavidades.

El área total lateral de los moldes es $A_s = 2*(2*(0,72*0,82) + 3*(0,82*0,13)) \text{ m}^2 = 3 \text{ m}^2$

El área total de radiación es de $A_r = 2*3*(0,82*0,13) = 0,6396 \text{ m}^2$

El área de partición de la línea del molde es $A_{TR} = 1 \text{ m}^2$

El área de conducción entre las placas corresponde a $A_c = 0,84 \text{ m}^2$

El tiempo de apertura de las placas del molde es de 5 segundos.

Temperatura exterior al molde de 25°C.

Máquina 1

La máquina 1, al igual que las otras dos a analizar elaboran preformas en material PET, consta de 16 machos y 16 hembras (cavidades), tiene un promedio de 3600 piezas inyectadas por hora, cada una de las piezas con una masa de 8,3 g, las figuras 11 y 12 ilustran la máquina y el molde respectivamente.



Figura 10. Máquina de inyección para preformas de 8,3 g.

Fuente: Empresa MINIPET



Figura 41. Sistema de machos y cavidades para el molde de 8,3 g.

Fuente: Empresa MINIPET

Calor extraído del polímero

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}C_p\Delta T$$

$$\dot{Q}_1 = \left(29,8 \frac{Kg}{h}\right) \left(0,48 \frac{Kcal}{KgK}\right) (260 - 45)^\circ C$$

$$\dot{Q}_1 = 3075,36 \frac{Kcal}{h}$$

$$\dot{Q}_1 = 1,02 \text{ TNR}$$

Calor extraído por convección

$$\dot{Q}_{Co1} = \alpha_L(T_{molde1} - T_{ambiente}) \left(A_s + \frac{A_{TR}t_{apertura}}{t_{ciclo}}\right)$$

$$\dot{Q}_{Co1} = \left(8 \frac{W}{m^2^\circ C}\right) (25 - 23)^\circ C \left((3m^2) + \frac{1m^2 * 5s}{16s}\right)$$

$$\dot{Q}_{convección1} = 53,5 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{convección1} = 0,015 \text{ TNR}$$

Calor extraído por conducción

$$\dot{Q}_{cond1} = A_A\beta(T_{molde1} - T_{ambiente})$$

$$\dot{Q}_{cond1} = (0,84m^2) \left(98 \frac{W}{m^2^\circ C}\right) (25 - 23)^\circ C$$

$$\dot{Q}_{cond1} = 164,65 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{cond1} = 0,046 \text{ TNR}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Calor extraído por radiación

$$\dot{Q}_{rad\ 1} = A_r \varepsilon \sigma \left(\left(\frac{T_{molde\ 1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ambiente}}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad\ 1} = (0,6396m^2) \left(5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \right) \left(\left(\frac{273,15 + 25}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 23}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad\ 1} = 2 * 5,03 * 10^{-7} W$$

$$\dot{Q}_{rad\ 1} = 0,000000286\ TNR$$

Calor a eliminar por el refrigerante

$$\dot{Q}_{refrigerante} = 1,02\ TNR - (0,046 + 0,000000286 + 0,015)TNR = 0,96\ TNR$$

Calor total extraído

$$\dot{Q}_{total\ 1} = \dot{Q}_{refrigerante\ 1} + \dot{Q}_1 = (0,96 + 1,02)TNR = 1,98\ TNR$$

El cálculo de carga térmica para las otras máquinas se encuentra en el apéndice A, debido a que siguen un procedimiento similar a ilustrado anteriormente.

3.2 Flujo volumétrico de refrigerante a surtir a cada máquina

Establecido el calor que se debe de extraer del molde, se procede a calcular el caudal de agua fría que deberá fluir para lograr tal fin de refrigeración efectiva, para ello se tiene en cuenta que el fluido refrigerante que deberá proveerse a 18°C y que en este rango el refrigerante incrementa su temperatura en 1,5 °C, entre la entrada y salida en la máquina

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Máquina 1

$$\dot{V}_1 = \frac{C_{p \text{ material}}(T_{inyección 1} - T_{demolde 1}) * \dot{m}_{material}}{C_{p \text{ refrigerante}} \Delta T_{refrigerante} \delta_{refrigerante}}$$

$$\dot{V}_1 = \frac{\left(2 \frac{KJ}{kg^{\circ}C}\right) (260 - 45)^{\circ}C * \left(29,8 \frac{Kg}{h} * \frac{1h}{3600s}\right)}{4,2 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} 1,5^{\circ}C * \left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right)}$$

$$\dot{V}_1 = 5,64 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V}_1 = 0,56 \frac{L}{s}$$

$$\dot{V}_1 = 33,6 \frac{L}{min}$$

3.3 Tiempo de curado

Ahora se procede a calcular el tiempo de curado o de enfriamiento del polímero, para lograr la rigidez en el producto final y un espesor s de 2mm en éste.

$$t_{enfriamiento} = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{4(T_{inyección} - T_{pared})}{\pi(T_{desmolde} - T_{pared})} \right)$$

$$t_{enfriamiento} = \frac{4mm^2}{\pi^2 \left(0,076 \frac{mm^2}{s}\right)} \ln \left(\frac{4(260 - 19)}{\pi(45 - 19)} \right)$$

$$t_{enfriamiento} = 13,16 s$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se realizará un contraste entre los costos actuales de operación del sistema de refrigeración de los moldes de las máquinas de inyección y los costos que se espera obtener luego de realizar el rediseño, para ello se revisa históricos de producción y valores de costo de energía, luego se analiza las posibilidades que se presentan en el mercado de sistemas de refrigeración, con el fin de sugerir a la empresa un sistema que sea centralizado y que cumpla con las necesidades de potencia y caudal de agua.

Se tabula los requerimientos de carga térmica, caudal y los requerimientos generales de cada máquina para tener una visión más amplia proceso.

Requerimientos de carga térmica

Máquina	Calor del polímero (TNR)	Calor de conducción (TNR)	Calor de radiación (TNR)	Calor de convección (TNR)	Calor Refrigerante	Calor total máquina (TNR)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1	1,02	0,046	$2,86 \cdot 10^{-7}$	0,015	0,96	1,98
2	0,63	0,046	$2,86 \cdot 10^{-7}$	0,015	0,5689	1,2
3	3,72	0,046	$2,86 \cdot 10^{-7}$	0,015	3,66	7,38
Calor Total (TNR)	5,37	0,138	$8,58 \cdot 10^{-7}$	0,045	5,1889	10,56

Tabla 6. Requerimientos de carga térmica.

Fuente: Elaboración propia

Requerimientos de caudal de agua para las maquinas inyectoras

Máquina	Flujo volumétrico de agua (L /min)
1	33,6
2	24
3	123,6
Total	181,2

Tabla 7. Requerimientos de flujo volumétrico.

Fuente: Elaboración propia

Requerimientos generales para las maquinas inyectoras

Máquina	Calor a extraer (TNR)	Caudal de agua (L/min)	Tiempo de curado (s)
1	1,98	33,6	

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2	1,2	24	13,16
3	7,38	123,6	
Total	10,56 TNR	181,2	13,16

Tabla 8. Requerimientos generales por máquina.

Fuente: Elaboración propia

Costos de operación

Costos de producción actuales por unidad de energía:

En el momento se establece a partir del máximo consumo de energía en potencia eléctrica un valor aportado por la empresa de energía (EPM) de 434 \$ KWh, este valor del KWh es el propuesto en la zona industrial en la cual se encuentra ubicada la planta, así con el consumo actual de 15 TNR (52,75 KW) (Fuente: Empresa MINIPET), el costo de operación mensual es:

$$\begin{aligned}
 \text{Costo operación mensual actual} &: 52750 \text{ KWh} * \frac{434\$}{\text{KWh}} \\
 \text{Costo operación mensual actual} &= \$22'880.480
 \end{aligned}$$

Este costo mensual solo tiene en cuenta la potencia disipada en las máquinas de inyección y no los consumos por aparatos externos como torres de agua, bombas, etc.

Costos esperados luego de calcular la potencia del sistema de refrigeración centralizado:

Luego, el valor calculado de 10,56 TNR sumado a la carga térmica necesaria para el sistema de inyección de colada fría arroja un resultado de 11,06 TNR, adicional a este valor, se suma al total otras 2 TNR (Valor final de 13,06 TNR) como factor de seguridad en caso de que la empresa decida aumentar la producción podrá contar con un crecimiento de un 25% con el fin de contar con la capacidad de enfriamiento para un proceso nuevo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\text{Costo operación mensual teórico: } 45930 \text{ KWh} * \frac{434\$}{\text{KWh}}$$

$$\text{Costo operación mensual teórico: } \$19'933.620$$

De nuevo se hace claridad en que solo se tuvo en cuenta el gasto energético de las inyectoras para el cálculo del costo de operación mensual teórico.

Propuesta del sistema de refrigeración centralizado

Se propone como sistema de enfriamiento de los moldes de colada caliente el chiller de agua fría, pues representan un gasto menor para lograr el objetivo de reducir costos y aún más importante, son excelentes para trabajar en sistemas centralizados que tengan necesidades de refrigeración similares, es decir, para diferentes máquinas inyectoras que operen bajo similares condiciones de temperatura como es el caso del conjunto de máquinas de la empresa MINIPET. Los chillers que hay en el momento en la empresa fueron obtenidos directamente del proveedor chino BEST SINCERE INDUSTRY LIMITED; la siguiente database muestra los diferentes tipos de chiller de agua que operan bajo distintas condiciones de potencia y caudal de agua disponibles por el proveedor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO					Código	FDE 089
						Versión	03
						Fecha	2015-01-22

TECHNICAL DATA 技术参数

Model 型号	UNIT	SI-05W	SI-08W	SI-10W	SI-15W	SI-20W	SI-30W	SI-40W	SI-50W
Item 项目									
Cooling capacity 冷冻能力	WATTS	11324	20540	28400	43100	58600	86200	117200	139400
	BTU/HR	38650	77300	97000	147200	199850	294400	399700	476000
	KCAL/HR	9740	19480	24444	37094	50362	74189	100724	119952
Refrigerant									
Type 制冷剂	R22								
压缩机 Compressor	KW	3.3	6	7.5	11.25	15	22.5	30	37.5
Motor	HP	4.5	8	10	15	20	30	40	50
Condenser water flow rate 冷却水量	L/MIN	58	100	120	200	250	360	440	560
Voltage 电压	Phase/Hz	380V-400V/3PHASE(50Hz-60Hz)							
Water tank capacity 水箱容量	Liter	65	140	220	380	500	520	630	800
水泵功率 Water	KW	0.37	0.75	0.75	1.5	1.5	3.75	5.62	5.62
Pump	HP	1/2	1	1	2	2	5	7.5	7.5
Flow rate 水泵流量	L/MIN	50-100	100-200	100-200	160-320	160-320	400-800	630-1200	630-1200
Running current 使用 电流	AMP	7	13	15	27	39	55	72	88
Insulation material 绝缘材料	发泡胶带, 橡胶塞膏 POLY-FOAM TAPE RUBBERIZED TUBU INSULATION								
Dimension 尺寸	MM	865*530*	1070*685*	1270*710*	1530*710*	1680*810*	1980*860*	1930*1120*	2000*1150*
N.W. 净重	KG	125	240	320	570	680	920	1180	1300

Figura 52. Database de diferentes tipos de chiller ofrecidos por la empresa BEST SINCERE INDUSTRY LIMITED.

Recuperado de: (Best Sincere Industry Limited, 2018)

De la anterior figura se puede observar que el chiller que mejor se adapta a las necesidades de la empresa MINIPET es el modelo SI-20W, que permite una capacidad de refrigeración de 58,6 KW y un caudal de agua que se encuentra en el rango de 160-320

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

L/min; sin duda, el chiller que se propone en este texto satisface con creces las necesidades de potencia y de flujo de agua para refrigerar.



Figura 63. Chiller de Agua sugerido para satisfacer las necesidades de la empresa MINIPET.

Recuperado de: (Best Sincere Industry Limited, 2018)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Se establece entonces un valor para la carga térmica del sistema que será centralizado de 13,06 TNR, en ninguno de los casos se hizo verosimilitud con el sistema en tiempo estable (Que sería lo apropiado en un estudio estadístico), en cambio, se tomó los valores máximos de producción para establecer la capacidad máxima de refrigeración para que pueda haber ampliación o reducción del flujo másico (producción).

El flujo volumétrico de agua se establece en total en un valor de 181,12 L/min a una temperatura de 18 °C; esta tasa deberá ser mantenida por medio de una bomba que no permita caídas de presiones, se aclara que en el estudio realizado no se tiene en cuenta ni la potencia de la bomba ni el sistema de tubería que deberá tener el sistema de refrigeración para lograr mantener constante el caudal.

Todas las 3 inyectoras operan bajo las mismas condiciones de temperatura de inyección, pared y desmolde, por tanto, para las 3 se establece un tiempo de curado para el plástico de 13,16 s.

En la actualidad la empresa cuenta con distintos tipos de chiller para satisfacer las demandas de potencia para cada inyectora, en total la potencia utilizada actual es de 15 TNR (Valor calculado empíricamente por los trabajadores de la empresa), qué es superior al valor teórico calculado, en síntesis, la centralización del sistema permite obtener el mismo flujo másico con una potencia que en medida es más reducida, así, se ve reflejado en un menor consumo de energía eléctrica para obtener el mismo número de piezas estipuladas en cada una de las máquinas. Así, se sugiere entonces considerar la opción de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

adquirir el chiller de agua SI-20W de la empresa BEST SINCERE INDUSTRY LIMITED para obtener el sistema de refrigeración en su forma más simplificada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

Berins, M. (1991). *Plastic Engineering Handbook Of The Society Of The Plastics Industry*. New York.

Best Sincere Industry Limited. (5 de 1 de 2018). Obtenido de Best Sincere Industry Limited:
http://www.sincereindustry.com/html_products/WATER-CHILLER-37.html

Boyard, N. (2016). *Heat Transfer in Polymer Composite Materials. Formind Processes*. Wiley.

Bryce, D. M. (2016). *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals* (Vol. 4). Dearborn: Society of Manufacturing Engineres.

Carslaw, H., & Jaeger, J. (1959). *Heat conduction in a melting solid*.

Duleba, B., & Greskovic, F. (2015). Conformal cooling for plastics injection moulding. *SciELO*.

Eras López, M. (2015). *Rediseño de un sistema de distribución hidráulica para enfriamiento de máquinas y moldes de inyección en una industria plástica (tesis de pregrado)*. Guayaquil.

Giles, J., Wagner, J., & Mount, E. (2014). *Extrusion*. Oxford: William Andrew Publishing.

Groover, M. (2014). *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, Processes and Systems* (4 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.

Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2006). *Fundamentals of Heta and Mass Transfer* (6 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.

Kutateladze, S. (1963). *Fundamentals of heat transfer*. Londres: Hodder & Stoughton.

Kutz, M. (2017). *Applied Plastics Engineering Handbook*. Cambridge: William Andrew Publishing.

landau. (2004). *maquinas de rotomoldeos*. nuevo mexico.

Páramo, G., & Guarín, A. (2002). Estudio del estado del arte de moldes de inyección. *Revista Universidad EAFIT*.

Rees, H. (1994). *Undertanding injection molding technology*. New York: Hanser publisher.

Rosato, D., Rosato, M., & Rosato, D. (2004). *Plastic Product Material and Process Selection Hamdbook*. Oxford: Elsevier.

Rubin, I. (1972). *Injection molding; Theory and practice*. New York: Wiley.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Stelson, K. A. (2003). Calculating cooling times for polymer injection moulding. *Proc. Instn Mech. Engineering Manufacture*, 711.

Tang , L., Chassapis, C., & Manoochehri, S. (1997). *Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding. Finite Elements in Analysis and Design*.

Williams, J. (2018). ¿ De qué depende el tiempo de enfriamiento en el moldeo por inyección ? *tecnología del plástico* , 1.

zarkadas, D., & xanthos, M. (2003). prediccion of cooling time in inyection molding by means of a simplified semianalytical equation. *advance in polymer technology* , pág. 203.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A

Continuación de los cálculos de carga térmica. Flujos de calor en las máquinas 2 y 3

Máquina 2

La máquina 2 es inyectora del mismo material (PET) y realiza preformas para envases plásticos con una masa de 5,4 g, en cada desmoldada eyecta 12 preformas inyectadas (12 machos y 12 hembras), en las figuras 15 y 16 se puede apreciar la máquina y el sistema de machos respectivamente.



Figura 74. Máquina de inyección para preformas de 5,4 g.

Fuente: Empresa MINIPET

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

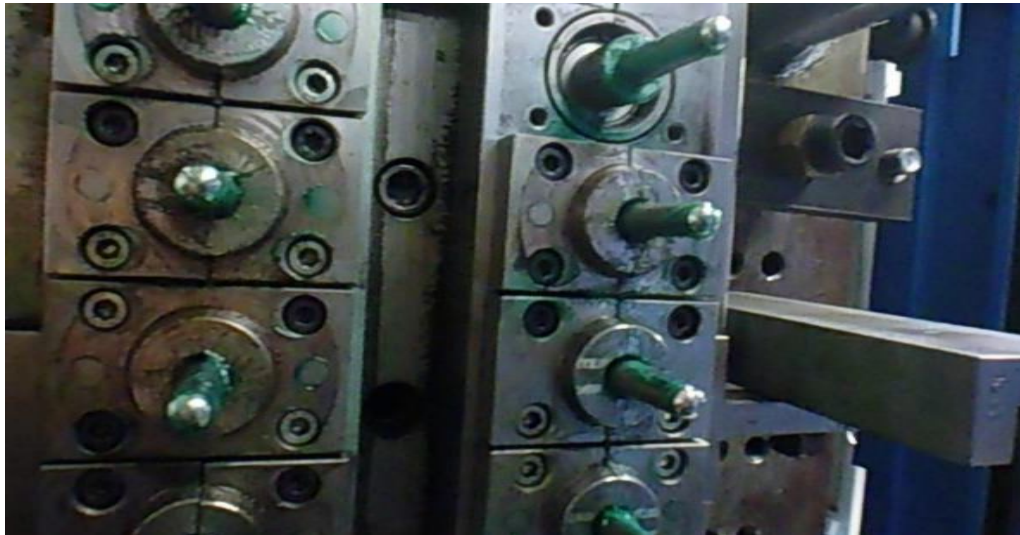


Figura 85. Sistema de machos para el molde de 5,4 g de 12 cavidades.

Fuente: Empresa MINIPET

Calor extraído del polímero

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}C_p\Delta T$$

$$\dot{Q}_2 = \left(21,2 \frac{Kg}{h}\right) \left(0,48 \frac{Kcal}{KgK}\right) (260 - 45)^\circ C$$

$$\dot{Q}_2 = 2187,84 \frac{Kcal}{h}$$

$$\dot{Q}_2 = 0,63 \text{ TNR}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Calor extraído por convección

$$\dot{Q}_{co\ 2} = \alpha_L(T_{molde\ 2} - T_{ambiente}) \left(A_s + \frac{A_{TR}t_{apertura}}{t_{ciclo}} \right)$$

$$\dot{Q}_{co\ 2} = \left(8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (25 - 23)^\circ C \left((3m^2) + \frac{1m^2 * 5s}{16s} \right)$$

$$\dot{Q}_{co\ 2} = 53,5\ W$$

$$\dot{Q}_{co\ 2} = 0,015\ TNR$$

Calor extraído por conducción

$$\dot{Q}_{cond\ 2} = A_A \beta (T_{molde\ 2} - T_{ambiente})$$

$$\dot{Q}_{cond\ 2} = (0.84m^2) \left(98 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (25 - 23)^\circ C$$

$$\dot{Q}_{cond\ 2} = 164,65\ W$$

$$\dot{Q}_{cond\ 2} = 0,046\ TNR$$

Calor extraído por radiación

$$\dot{Q}_{rad\ 2} = A_r \varepsilon \sigma \left(\left(\frac{T_{molde\ 2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ambiente}}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad\ 2} = (0,6396m^2)(0,8) \left(5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right) \left(\left(\frac{273,15 + 25}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 23}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad\ 2} = 2 * 5,03 * 10^{-7} W$$

$$\dot{Q}_{rad\ 2} = 0,000000286\ TNR$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Calor a eliminar por el refrigerante

$$\dot{Q}_{refrigerante\ 2} = 0,63\ TNR - (0,046 + 0,000000286 + 0,015)TNR = 0,5689\ TNR$$

Calor total extraído

$$\dot{Q}_{total\ 2} = \dot{Q}_{refrigerante\ 2} + \dot{Q}_2 = (0,63 + 0,5689)TNR = 1,2\ TNR$$

Máquina 3

La máquina 3 (figura 15) se presenta en la figura 12, corresponde a la inyectora de preformas de 24 g y trabaja con un promedio de 109 Kg por hora de plástico, su sistema de machos y hembras corresponde a 24 pares (figura 16).



Figura 96. Máquina de inyección para preformas de 24 g.

Fuente: Empresa MINIPET



Figura 107. Sistema de machos y hembras para el molde de 24 g y 24 cavidades.

Fuente: Empresa MINIPET

Calor extraído del polímero

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}C_p\Delta T$$

$$\dot{Q}_3 = \left(109 \frac{Kg}{h}\right) \left(0,48 \frac{Kcal}{KgK}\right) (260 - 40)^\circ C$$

$$\dot{Q}_3 = 11248,8 \frac{Kcal}{h}$$

$$\dot{Q}_3 = 3,72 \text{ TNR}$$

Calor extraído por convección

$$\dot{Q}_{co3} = \alpha_L(T_{molde3} - T_{ambiente}) \left(A_s + \frac{A_{TR}t_{apertura}}{t_{ciclo}} \right)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q}_{co3} = \left(8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (25 - 23)^\circ C \left(3m^2 + \frac{1m^2 * 5s}{16s}\right)$$

$$\dot{Q}_{co3} = 53,5 W$$

$$\dot{Q}_{co3} = 0,015 TNR$$

Calor extraído por conducción

$$\dot{Q}_{cond3} = A_A \beta (T_{molde3} - T_{ambiente})$$

$$\dot{Q}_{cond3} = (0,84m^2) \left(98 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (25 - 23)^\circ C$$

$$\dot{Q}_{cond3} = 164,65 W$$

$$\dot{Q}_{cond3} = 0,046 TNR$$

Calor extraído por radiación

$$\dot{Q}_{rad3} = A_r \varepsilon \sigma \left(\left(\frac{T_{molde3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ambiente}}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad3} = (0,6396m^2)(0,8) \left(5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right) \left(\left(\frac{273,15 + 25}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + 23}{100} \right)^4 \right)$$

$$\dot{Q}_{rad3} = 2 * 5,03 * 10^{-7} W$$

$$\dot{Q}_{rad3} = 0,000000286 TNR$$

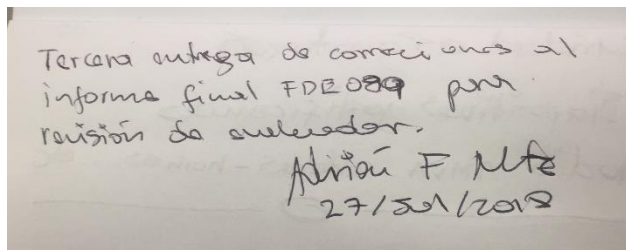
Calor a eliminar por el refrigerante

$$\dot{Q}_{refrigerante3} = 3,72 TNR - (0,046 + 0,000000286 + 0,015) TNR = 3,66 TNR$$

Calor total extraído

$$\dot{Q}_{total3} = \dot{Q}_{refrigerante3} + \dot{Q}_3 = (3,66 + 3,72) TNR = 7,38 TNR$$

FIRMA ESTUDIANTES _____



FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____