



**Análisis de carga térmica para retirar el calor sensible del proceso de inyección de plástico,
para implementar la distribución adecuada de cargas en los equipos de refrigeración y
definir si el sistema cumple con la demanda y proyección en la empresa SI Plásticos**

David Alejandro Gil Valencia

Informe de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Asesor interno

John Jairo Villa Cataño, Ingeniero Mecánico

Asesor externo

Gustavo Adolfo Villacob Martínez, Ingeniero de Mantenimiento

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita

(Gil Valencia, 2022)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Gil Valencia, D.A, (2022). *Análisis de carga térmica para retirar el calor sensible del proceso de inyección de plástico, para implementar la distribución adecuada de cargas en los equipos de refrigeración y definir si el sistema cumple con la demanda y proyección en la empresa SI Plásticos*. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de documentación ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. OBJETIVOS	3
3.1. Objetivo general	3
3.2. Objetivo específico.....	3
4. MARCO TEÓRICO.....	3
4.1. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	3
4.2. Torres de enfriamiento	4
4.3 Chiller.....	5
4.4. Inyectora de plástico.....	6
4.1.1 Periféricos	7
4.5. Sistema de refrigeración en los componentes de las inyectoras de plástico	9
4.6. Primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía.....	12
5. METODOLOGÍA	13
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS	16
6.1 Análisis térmico de moldes	16
6.1.1 Cálculo Teórico.....	16
6.1.2 Cálculo Experimental.....	18
6.2 Análisis térmico de los componentes de las inyectoras	19
6.2.1 Condiciones habituales	19
6.1.2 Condiciones a máxima carga térmica	20
6.3 Proyección con nuevas inyectoras de plástico	23
7. CONCLUSIONES	25
8. BIBLIOGRAFÍA	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. Figura tomada de [1].	4
Figura 2. Torre de enfriamiento de tiro inducido. Figura tomada de [2].	5
Figura 3. Chiller Hitema 10 TR en SI Plásticos.	6
Figura 4. Componentes en inyectora de 1100 toneladas de inyección.	7
Figura 5. Atemperador inyectora 400T.	8
Figura 6. Deshumidificador inyectora 1100T.	8
Figura 7. Robot de extracción de piezas inyectora 1100T.	9
Figura 8. a) Entrada y salida distribuidor, b) Electroválvulas y distribuidor de agua fría.	9
Figura 9. Intercambiador de aceite inyectora Engel.	10
Figura 10. a) Unidad de inyección Engel, b) Traversa del tren de inyección.	10
Figura 11. Gabinete de los componentes electrónicos.	11
Figura 12. a) Unidad de inyección Lien Yu, b) Entradas y salidas del intercambiador de aceite y travesa del tren de inyección inyectora Lien Yu.	11
Figura 13. Molde de inyección de plástico.	12
Figura 14. a) Termómetro digital DE-305, b) Termocupla tipo K.	15
Figura 15. Mediciones de caudal.	16
Figura 16. a) Apertura electroválvula de travesa, b) Apertura de electroválvula del intercambiador de aceite.	20
Figura 17. a) Panel inyectora Engel, b) Tarjeta de acceso Engel nivel 11.	21
Figura 18. Presión del circuito de la red de agua de refrigeración.	22
Figura 19. Entalpías del proceso de inyección de plástico.	22
Figura 20. Chiller de 20 y 10 toneladas de refrigeración.	24

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de actividades.	14
Tabla 2. Cronograma de actividades semestre de industria.	14
Tabla 3. Propiedades de los materiales plásticos.	17
Tabla 4. Calor específico y temperatura de fusión de la materia prima.	18
Tabla 5. Cálculo toneladas de refrigeración molde método teórico.....	18
Tabla 6. Cálculo toneladas de refrigeración de moldes método experimental.....	19
Tabla 7. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras en condiciones habituales.....	20
Tabla 8. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras método calor sensible.....	21
Tabla 9. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras primera ley de la termodinámica.....	23

1. RESUMEN

Este informe tiene como motivo presentar los análisis de carga térmica para conocer las capacidades de refrigeración que demandan las siete inyectoras de plásticos que hay actualmente en la compañía y dos nuevas inyectoras que vienen en camino para el año 2022, tales como remover el calor sensible del aceite de las bombas hidráulicas, travesa de inyectoras, componentes electrónicos y moldes. Actualmente se han presentado varios paros debido al sobrecalentamiento de algunas inyectoras por un desbalanceo de flujos en equipos de refrigeración, por lo que distribuyendo las cargas que demanda cada componente del proceso de inyección, se puede conocer el estado del sistema y evitar así esta problemática, además que se puede proyectar el crecimiento de la compañía.

2. INTRODUCCIÓN

La compañía SI³ es una sociedad conformada por Colauto S.A.S, SI Plásticos y SI Ensamblés. Estas dos últimas compañías están ubicadas en la vereda Chachafruto en la zona franca de Rionegro. SI Plásticos es una compañía productora de piezas plásticas inyectadas con capacidad desde 200 a 1100 toneladas de inyección y con alta tecnología. Para mantener la producción a flote, la planta cuenta con 7 inyectoras de plásticos, 5 de ellas tecnología nueva de Engel y 2 inyectoras Lien Yu para producción de piezas plásticas por medio de una gran variedad de moldes.

Es de vital importancia el proceso de enfriamiento de los componentes de las máquinas compuesta por bombas, travesa del husillo de inyección, componentes electrónicos y periféricos como moldes. La planta de SI Plásticos contaba con dos chiller de 10 toneladas, sin embargo, uno de estos Chillers tuvo que ser trasladado a la planta de SI Ensamblés por un daño ocasionado por la fuga del refrigerante de un chiller de 20 toneladas de refrigeración, con el fin de no parar la producción. Debido a esta contingencia, el sistema actual de enfriamiento de la planta SI Plásticos está conformado por dos torres de enfriamiento de 56 y 44 toneladas de refrigeración y un Chiller de 10 toneladas de refrigeración.

En consecuencia, varias inyectoras se han venido alarmando por un incremento de temperatura debido a la alta producción que demandan las inyectoras y un desbalanceo de las cargas térmicas del sistema a los equipos de refrigeración. Adicionalmente, la compañía tiene pensado comprar dos inyectoras más, por lo que se busca distribuir y monitorear las variables de caudales y temperaturas para el análisis termodinámico de calor sensible y así mantener el equilibrio térmico garantizando que los equipos que hay actuales cumplan con la demanda de extracción de calor sensible y proyectar el análisis con las nuevas máquinas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Analizar la carga térmica del calor sensible del proceso de inyección de plástico para distribuir cargas en los equipos de refrigeración, definir si el sistema cumple con la demanda de producción y proyección del crecimiento en la empresa SI Plásticos.

3.2. Objetivo específico

- Analizar los parámetros requeridos de los equipos en los manuales
- Definir un cronograma para resaltar las actividades del proyecto
- Recolectar información del sistema de refrigeración de los sistemas de inyección de plástico
- Identificar elementos de medición para toma de muestras
- Medir los caudales y temperaturas de cada distribuidor
- Analizar la carga térmica del sistema de distribución de cada inyectora
- Estudiar las cargas térmicas para determinar la distribución correcta de flujos hacia los sistemas de enfriamiento y garantizar que los equipos actuales de refrigeración cumplan con la demanda y futuras proyecciones

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

Este sistema de refrigeración es el más utilizado en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor [1]. Se compone de 4 procesos, como se muestra en la **Figura 1**:

1-2 Compresión isentrópica en un compresor

2-3 Rechazo de calor a presión constante

3-4 Proceso de expansión isoentálpico

4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

En el punto 1 de la **Figura 1**, el refrigerante está como vapor saturado seco en condiciones de baja presión y temperatura, se comprime hasta el punto 2 para obtener vapor sobrecalentado en condiciones de alta presión y temperatura. Esta línea de descarga llega al condensador donde se rechaza calor a presión constante al medio adecuado (aire o agua), luego de 3 a 4 el fluido pasa por una válvula de estrangulamiento y se tiene una mezcla de líquido + vapor en condiciones de baja presión y temperatura. De 4 a 1 el refrigerante absorbe calor del espacio refrigerado.

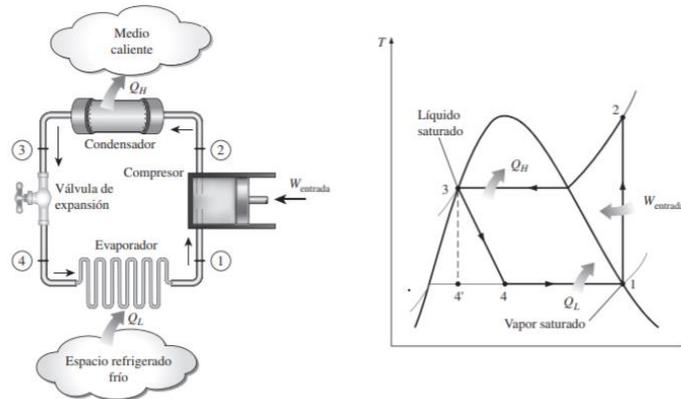


Figura 1. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. Figura tomada de [1].

4.2. Torres de enfriamiento

Estos equipos funcionan basados en el principio de enfriamiento evaporativo. Este proceso es natural y utiliza el agua como refrigerante, transmitiendo a la atmósfera el calor excedente de diferentes procesos y máquinas térmicas [2]. Una de las torres de enfriamiento más empleadas es la de tiro inducido a contraflujo que pulveriza el agua por medio de unas boquillas; un ventilador instalado en la parte superior encima del flujo de agua extrae el aire luego de hacer el intercambio de calor con el agua y una vez enfriada el agua, cae a un depósito en la parte inferior, donde vuelve al circuito.

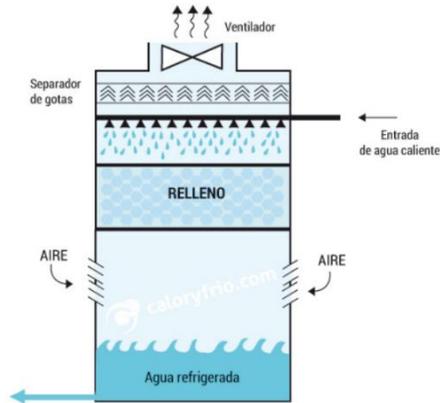


Figura 2. Torre de enfriamiento de tiro inducido. Figura tomada de [2].

En la empresa SI Plásticos, el circuito que integra la torre de enfriamiento consta de una tubería que sale de este equipo hasta un tubo madre y el fluido se distribuye a los distintos equipos que se desean refrigerar, una vez el flujo pasa por los equipos, el sistema de bombeo conformada por dos bombas hidráulicas pedrollo, ejercen la energía necesaria para transportar el fluido hacia las torres de enfriamiento y se repite el circuito. Este sistema se utiliza para enfriar los componentes de las inyectoras excepto los moldes de inyección.

4.3 Chiller

El enfriador de agua (o Chiller como se conoce en inglés) puede ser condensado por aire o por agua. El agua para refrigerar circula a través de un intercambiador de calor donde cede calor al refrigerante. El refrigerante al recibir este calor cambia de la fase líquida a la fase de vapor, luego se comprime en un compresor en cuya descarga se tiene vapor sobrecalentado, a alta presión y temperatura. Desde allí, viaja al condensador donde el aire o el agua extrae calor del refrigerante [3]. Después del condensador, el líquido refrigerante viaja hasta la válvula de expansión donde al pasar por dicho elemento, se obtiene una mezcla de líquido + vapor, llegando de nuevo al evaporador y allí recibe de nuevo calor del agua, repitiéndose el ciclo.



Figura 3. Chiller Hitema 10 TR en SI Plásticos.

En la empresa SI Plásticos, el circuito que integra el enfriador de agua consta de una tubería que sale de este equipo hasta un tanque de agua fría, después mediante una bomba hidráulica conduce el fluido a un tubo madre que se distribuye a los distintos equipos que se desean refrigerar; una vez el flujo pasa por los equipos, este se dirige hacia un tanque de agua caliente, donde otra bomba hidráulica transporta el fluido hacia el chiller y se repite el circuito. Este sistema de agua helada se utiliza para enfriar solo los moldes.

4.4. Inyectora de plástico

La máquina de inyección de plástico es una máquina que funde el plástico por medio de un husillo rodeado de unas resistencias cerámicas que inyecta el plástico a través de una boquilla hacia el molde. Entre los materiales que utiliza la compañía para la producción están:

- ABS
- Policarbonato
- Nylon
- POM
- Polipropileno
- Poliestireno
- Poliamida

La inyectora está conformada por las siguientes unidades:

- **Unidad de potencia:** Bombas de aceite para accionar los cilindros hidráulicos de cierre de molde y desplazamiento del tren de inyección.
- **Unidad de inyección:** Conformada por el husillo, tolvas de alimentación de material y resistencias cerámicas.
- **Unidad de control:** Conformada por PLC, componentes electrónicos y gabinetes eléctricos
- **Unidad de molde:** Conformada por placas magnéticas que aseguran los moldes, moldes y distribuidores de agua para refrigeración.



Figura 4. Componentes en inyectora de 1100 toneladas de inyección.

4.1.1 Periféricos

Para garantizar unas condiciones óptimas del producto final son necesarios los siguientes equipos:

Atemperador: Cuenta con un pequeño tanque de almacenamiento de agua y que al pasar por una resistencia eléctrica calienta el fluido que va hacia el molde y regresa al tanque, de esta manera se garantiza una temperatura requerida según el plan de control de la pieza en el molde de inyección.



Figura 5. Atemperador inyectora 400T.

Deshumidificador: Este equipo utiliza aire comprimido caliente y seco para calentar y extraer humedad de algunas materias primas que así lo requieren, logrando una temperatura indicada en la tolva según el plan de control de la referencia, obteniendo así una pieza final de calidad.



Figura 6. Deshumidificador inyectora 1100T.

Robot: Este equipo tiene la capacidad de moverse en los tres ejes coordenados X, Y y Z para lograr capturar la pieza después de inyectada, mediante configuraciones de ventosas que varían dependiendo de cada referencia. Cada referencia tiene su programación para lograr llevar la pieza desde la extracción del molde hasta el operario de producción.



Figura 7. Robot de extracción de piezas inyectora 1100T.

4.5. Sistema de refrigeración en los componentes de las inyectoras de plástico

Las inyectoras 300,400,1100,200 y 550 toneladas de inyección de la compañía corresponden a inyectoras fabricadas por Engel, estas máquinas poseen un distribuidor con electroválvulas que permite la apertura o cierre del flujo de agua a los sistemas que requiere extraer calor; este distribuidor se muestra en la **Figura 8**. Los sistemas que requieren refrigeración están conformados por un intercambiador de aceite de las bombas hidráulicas, travesa del tren de inyección y componentes electrónicos refrigerados por aceite.



Figura 8. a) Entrada y salida distribuidor, **b)** Electroválvulas y distribuidor de agua fría.

En la **Figura 9**, se muestra el intercambiador de calor del aceite.



Figura 9. Intercambiador de aceite inyectora Engel.

En la **Figura 10**, se muestra la travesa del tren de inyección que refrigera toda la camisa donde está el husillo y las resistencias cerámicas.



Figura 10. a) Unidad de inyección Engel, b) Travesa del tren de inyección.

En la **Figura 11**, se muestran los gabinetes donde están los drivers y componentes electrónicos de la inyectora.



Figura 11. Gabinete de los componentes electrónicos.

Las inyectoras 700-1 y 700-2 toneladas de inyección de la compañía corresponden a inyectoras fabricadas por la compañía asiática Lien Yu. A diferencia de las inyectoras Engel, el sistema de distribución es directo y no cuenta con electroválvulas para refrigerar los componentes. Los sistemas para refrigerar son la travesa y el intercambiador de aceite de las bombas hidráulicas como se muestra en la **Figura 12**.



Figura 12. a) Unidad de inyección Lien Yu, b) Entradas y salidas del intercambiador de aceite y travesa del tren de inyección inyectora Lien Yu.

Todas las inyectoras se les adecuan moldes dependiendo de la referencia o pieza que se desea inyectar, muchos de estos moldes requieren refrigeración y otros no, cuando es el último caso, se utiliza el atemperador para el precalentamiento de los moldes.



Figura 13. Molde de inyección de plástico.

4.6. Primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía

Para el análisis de transferencia de calor entre el volumen de control y los alrededores, es necesario el análisis termodinámico por medio del análisis de energía de sistemas en flujo estacionario para flujos continuos, es decir, el contenido de masa y energía del volumen de control permanecen constantes en el tiempo [1].

La energía tanto de entrada como de salida se puede transferir por calor, trabajo y la energía de la masa; el balance de energía viene dado por:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt} = 0 \quad [KW] \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{entrada} + \dot{W}_{entrada} + \sum_{Entrada} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{salida} + \sum_{Salida} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) [KW]$$

Donde:

\dot{Q} = Tasa de transferencia de calor [KW]

\dot{W} = Potencia [KW]

\dot{m} = Flujo másico [Kg/s]

Δh = Cambio de entalpía del fluido [KJ/Kg]

$\Delta ep = \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2}$ = Cambio en la energía cinética [m²/s²]

$\Delta ep = g Z_2 - g Z_1$ = Cambio en la energía potencial [m²/s²]

Cuando el fluido entra y sale aproximadamente a la misma velocidad, se puede despreciar el cambio en la energía cinética al igual que el cambio en la energía potencial, debido a que la elevación entre la entrada y salida del flujo es despreciable, es decir, $\Delta e_p \approx 0$ y $\Delta e_c \approx 0$. Por este motivo, el balance de energía o primera ley de la termodinámica se reduce a [1]:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \Delta h \text{ [KW]} \quad (2)$$

En el proceso de extracción de calor en el interior de los moldes y de inyectoras no se está generando trabajo, por lo tanto $\dot{W} = 0$.

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h \text{ [KW]} \quad (2)$$

Ahora si el proceso se efectúa a presión constante y hay cambio de temperatura, la fórmula de la tasa de transferencia de calor puede expresarse como:

$$\dot{Q}_{sensible} = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \text{ [KW]} \quad (3)$$

Donde:

$\dot{Q}_{sensible}$ = Tasa de transferencia de calor o calor sensible [KW]

\dot{m} = Flujo másico [Kg/s]

C_p = Calor específico del fluido [J/Kg °C] (para el agua $C_p = 4186 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$)

ΔT = Diferencia de temperatura de entrada y salida [°C]

Para hallar el flujo másico con los datos de caudal, se emplea la **Ecuación 4**:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V} \quad (4)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [Kg/m³] (Aproximadamente 1000 Kg/m³ para el agua a la temperatura del proceso)

\dot{V} = Flujo volumétrico o caudal del fluido [m³/s]

5. METODOLOGÍA

Las actividades que se realizaron durante el semestre de industria son las siguientes:

Actividad	Descripción
1	Búsqueda de parámetros en manuales para todos los equipos
2	Recolectar información del sistema de refrigeración de los sistemas de inyección de plástico
3	Búsqueda de instrumentos de medición con el área de metrología
4	Medición de caudal y temperatura en los distribuidores de agua de las máquinas
5	Consolidado de mediciones
6	Análisis termodinámico para calcular el calor sensible del sistema y garantizar que los equipos actuales de refrigeración cumplan con la demanda y futuras proyecciones
7	Distribuir las cargas térmicas hacia las torres de enfriamiento y Chillers
8	Seguimiento del comportamiento de temperaturas en las inyectoras
9	Identificación y estudio de nuevas inyectoras que se van a comprar

Tabla 1. Lista de actividades.

En la **Tabla 2**, se presenta el cronograma de actividades que se realizaron durante el semestre de industria.

Actividad	Semanas																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	■	■	■																	
2	■	■	■	■	■	■														
3			■	■																
4				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
5							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
6													■	■	■	■	■	■	■	■
7																		■	■	■
8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9														■	■	■	■	■	■	■

Tabla 2. Cronograma de actividades semestre de industria.

Para el análisis termodinámico, se buscaron inicialmente los parámetros recomendados por el fabricante de las máquinas en catálogos y manuales, luego se recolecta información de la fenomenología y funcionamiento de los sistemas de refrigeración de relevancia que merezca la investigación con el personal técnico. A partir de lo recolectado se realizan investigaciones y preguntas para plantear el procedimiento de estudio.

Para poder resolver las ecuaciones de primera ley de la termodinámica, es necesario conocer los valores de caudal y temperatura de las entradas y salidas del flujo de agua de los sistemas que necesitan refrigeración, es por esta razón, que se pidió en calidad de préstamo al área de metrología el termómetro digital PATOS DE-305 con una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el área de mantenimiento la termocupla tipo K que se usa para medir las temperaturas de las resistencias en el husillo del tren de inyección. En la **Figura 14**, se muestran los equipos que se emplearon para la toma de datos de temperatura del agua.



Figura 14. a) Termómetro digital DE-305, b) Termocupla tipo K.

Para las mediciones de caudal se empleó un balde con las marcaciones de litros en el interior como se muestra en la **Figura 15**. Se usó este método por las limitaciones económicas, de tiempo y por las exigencias de producción; lo ideal es contar con medidores de caudal adecuados, pero esto implica efectuar modificaciones en los circuitos de las máquinas y tiempo de paro de la producción. Se tomaron mediciones bases de un volumen de 5 litros y con ayuda de un cronómetro se midió el

tiempo que tarda en llenar el volumen, con el fin de hallar el caudal que circula en cada circuito interno.



Figura 15. Mediciones de caudal.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Análisis térmico de moldes

6.1.1 Cálculo Teórico

Para el cálculo teórico de las toneladas de refrigeración requerida en los moldes, se tiene en cuenta el molde más grande y con ciclos más pequeños que se pueden montar en cada inyectora, de esta forma garantizamos los flujos máxicos y el calor más grande que se debe extraer del proceso de inyección de plástico. De las fichas técnicas de estos moldes, se tiene el peso de la pieza y los ciclos, con estos valores se halla el flujo máxico \dot{m} del material plástico que se debe suministrar en cada inyección.

Para las temperaturas inicial y final se tiene en cuenta la temperatura de fusión del material de interés 30°C por encima, para garantizar que el plástico esté en estado líquido y una temperatura final de 40°C que es la temperatura que el operario o el robot extrae la pieza del molde. Por último,

para dar solución a la **Ecuación 3**, es necesario el calor específico del material de interés, esta información se recopila en las **Tablas 3 y 4**.

Material (ISO 1099)	ABS	ASA	EVA	HDPE	HIPS	LCP GF30	LDPE	PA11
Polymer	Acrylonitril-Butadien-Styrol	Acrylester-Styrol-Acrylonitril	Ethilen Vinylacetate	High Density Polyethylene	High Impact Polystyrene	Liquid Crystal Polymer	Low Density Polyethylen	Polyamide 11
Structure	amorphous	amorphous	semi-crystalline	semi-crystalline	amorphous	semi-crystalline	semi-crystalline	semi-crystalline
Density (g/cm ³)	1.05	1.07	0.92	0.96	1.05	1.4	0.92	1.03
Melt Density (g/cm ³)	0.95	0.94	0.75	0.73	0.96	1.17	0.75	0.97
Thermal Diffusivity aeff (mm ² /s)	0.083	0.085	0.09	0.092	0.09	0.09	0.09	0.09
Suggested Melt Temperature (°C)	200-600	220-260	150-220	219-300	203-240	290-370	190-220	200-250
Melt Temperature (°C)	230	240	185	240	220	330	210	230
Mould Temperature (°C)	40-80	40-80	10-40	20-50	20-60	30-150	20-30	30-40
Mean Ejection Temperature (°C)	80	80	60	85	80	220	70	140
Maximum Peripheral Screw Speed (m/s)	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.3	0.7	0.6
Maximum Hold Up Time (min)	4-8	4-8	4-10	4-12	4-8	5-10	4-12	4-8
Specific Back Pressure (bar)	70-150	30-90	15-45	15-45	100-200	0-30	15-45	50-150
Suggested Injection Speed	medium	medium	low	medium-high	medium-high	medium-high	medium-high	medium-high
Drying Time (h)	1-2	2-4	1-2	1	1-3	2-8	1	4
Drying Temperature (°C)	80-100	75-100	70	80	60-80	120-180	80	80-90
Bulk Density (kg/dm ³)	0.63	0.66	0.57	0.58	0.63	-	0.55	0.62
Air Volume (m ³ /hora)	1.62	1.62	2.86	2.23	1.62	-	2.36	1.63
Specific Heat Capacity (kJ/kg °K)	1.3	1.3	2.3	2.1	1.3	-	2.1	1.26

Material (ISO 1099)	PA6 GF30	PA66	PAI	PBT	PC	PC/ABS	PEEK	PE
Polymer	Polyamide 6 with glassfiber	Polyamide 66	Polyamidimide	Polybutylene terephthalate	Polycarbonate	Polycarbonate /ABS Blend	Polyether etherketone	Polyetherimide
Structure	semi-crystalline	semi-crystalline	amorphous	semi-crystalline	amorphous	amorphous	semi-crystalline	amorphous
Density (g/cm ³)	1.36	1.14	1.47	1.3	1.2	1.15	1.29	1.32
Melt Density (g/cm ³)	1.08	0.97	1.25	1.11	1.01	0.97	1.08	1.14
Thermal Diffusivity aeff (mm ² /s)	0.083	0.086	0.12	0.09	0.107	0.092	0.09	0.11
Suggested Melt Temperature (°C)	260-280	270-290	330-360	240-260	280-320	250-290	365-380	340-425
Melt Temperature (°C)	270	280	345	250	300	270	380	380
Mould Temperature (°C)	70-120	40-90	200-230	20-80	70-120	70-100	160-200	70-180
Mean Ejection Temperature (°C)	150	140	240	120	130	110	200	190
Maximum Peripheral Screw Speed (m/s)	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.15
Maximum Hold Up Time (min)	4-8	4-8	2.5	6-10	4-10	4-8	4-7	6-10
Specific Back Pressure (bar)	70-120	50-150	20-50	70-120	50-150	50-150	20-50	40-80
Suggested Injection Speed	low-medium	medium-high	medium-high	medium-high	medium-high	medium-high	medium	low-medium
Drying Time (h)	2-4	2-4	8-24	2-4	2-4	2-4	2-3	2-7
Drying Temperature (°C)	80	80	150	110-130	120	90-110	150-160	120-150
Bulk Density (kg/dm ³)	-	0.68	-	0.81	0.72	-	0.79	0.76
Air Volume (m ³ /hora)	-	2.11	-	1.72	1.34	-	2.54	1.40
Specific Heat Capacity (kJ/kg °K)	1.5	1.7	-	1.3	1.17	-	-	-

Material (ISO 1099)	PFA, ETFE	PLA	PMMA	POM	POM	PP	PP GF10
Polymer	Perfluoroalkoxy	Polylactic Acid	Polymethyl methacrylate	Polyoxymethylene Homopolymer	Polyoxymethylene Copolymer	Polypropylene	Polypropylene with glassfiber
Structure	semi-crystalline	amorphous	amorphous	semi-crystalline	semi-crystalline	semi-crystalline	semi-crystalline
Density (g/cm ³)	2.15	1.25	1.18	1.42	1.42	0.9	1.05
Melt Density (g/cm ³)	1.49	1.05	1.06	1.15	1.15	0.73	0.85
Thermal Diffusivity aeff (mm ² /s)	0.875	0.07	0.075	0.057	0.057	0.066	0.075
Suggested Melt Temperature (°C)	345-385	180-240	210-240	210-220	210-220	200-260	200-260
Melt Temperature (°C)	365	210	225	215	215	230	230
Mould Temperature (°C)	150-260	20-100	40-80	80-100	80-100	20-60	20-60
Mean Ejection Temperature (°C)	135	100	75	120	120	90	100
Maximum Peripheral Screw Speed (m/s)	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	0.7
Maximum Hold Up Time (min)	5-15	2-6	4-8	4-6	4-6	4-8	4-8
Specific Back Pressure (bar)	50-100	5-10	30-90	30-90	30-90	50-200	50-200
Suggested Injection Speed	low	medium-high	low-medium	medium	medium	medium-high	medium-high
Drying Time (h)	-	4-8	3-4	2	2	1	1
Drying Temperature (°C)	-	50-80	70-80	80	80	80	80
Bulk Density (kg/dm ³)	1.3	-	0.71	0.85	0.85	0.54	0.63
Air Volume (m ³ /hora)	1.28	-	1.83	1.66	1.66	2.00	1.80
Specific Heat Capacity (kJ/kg °K)	0.9	-	1.47	1.46	1.46	1.7-1.9	-

Tabla 3. Propiedades de los materiales plásticos.

De la **Tabla 3**, se extraen las propiedades de calor específico y temperatura de fusión de los materiales plásticos para el cálculo de calor.

MATERIAL	Cp [J/Kg °C]	T FUSIÓN [°C]
Polycarbonato PC	1170	300
ABS	1300	230
Polipropileno 06 PP	1700	230

Tabla 4. Calor específico y temperatura de fusión de la materia prima.

En la **Tabla 5**, se muestra el cálculo del calor que se debe extraer del material fundido en cada uno de los moldes en W. En el caso de que las 7 inyectoras de plástico estén en producción, es necesario extraer 37474,70 W. Para extraer esta cantidad de calor en los moldes, se requiere un sistema de enfriamiento mínimo de 10,66 toneladas de refrigeración.

MATERIAL	INYECTORA	MOLDE	PESO PIEZA [g]	CICLO [s]	\dot{m} [kg/s]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	\dot{Q} [W]	TON REF
PP	300	RR Tire	342,2	56	0,0061	40	260	220	2285,56	0,65
PP	400	Seat Base FrontPP	766,7	60	0,0128	40	260	220	4778,89	1,36
PP	1100	Base Sillin Twist	1408	50	0,0282	40	260	220	10531,84	2,99
ABS	700-2	Cover body R/L	1120	60	0,0187	40	260	220	6981,33	1,99
PP	700-1	Seat Base	1359,17	70	0,0194	40	260	220	7261,83	2,06
PC	200	Tc-Reflector	124	47	0,0026	40	330	290	1300,68	0,37
PP	550	Tc-Cubierta Superior	904	78	0,0116	40	260	220	4334,56	1,23
Σ									37474,70	10,66

Tabla 5. Cálculo toneladas de refrigeración molde método teórico.

6.1.2 Cálculo Experimental

Por cuestiones de producción, no es posible hacer el análisis térmico experimental de los moldes calculados teóricamente en la **Tabla 5**. Por este motivo se calcula la transferencia de tasa de calor para los moldes que estaban operando en el momento.

Para hallar el caudal de agua que circula por los moldes en la planta, se llena un volumen de 5 litros y el tiempo que transcurre en llenar. Con el dato de caudal y la densidad, se halla el flujo másico \dot{m} mediante la **Ecuación 4**. En las entradas y salidas de los moldes se mide las temperaturas a través del termómetro digital Patos DE-305 y la termocupla tipo K. Finalmente con el calor específico del agua ($C_p = 4186 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$), se da solución a la **Ecuación 3** del calor sensible.

En la **Tabla 6**, se muestra el cálculo del calor que se debe extraer del agua de refrigeración en cada uno de los moldes en W y en toneladas de refrigeración. En el caso de que las 7 inyectoras de plástico estén en producción, es necesario extraer 35840,09 W. Para extraer esta cantidad de calor

que pasa por los conductos de los moldes, se requiere un sistema de enfriamiento mínimo de 10,19 toneladas de refrigeración. Las mediciones se realizaron en diferentes días, esto porque no todas las inyectoras trabajan a la vez, por consiguiente, las temperaturas de entrada varían en cada inyectora.

INYECTORA	MOLDE	TIEMPO [s]	\dot{V} [L/s]	\dot{m} [Kg/s]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	\dot{Q} [W]	TON REF
300	AA Guardabarro Interno	81,8	0,0611	0,0611	14,1	26,8	12,7	3249,52	0,92
400	AA Guardabarro Trasero	55,18	0,0906	0,0906	14,9	25,2	10,3	3906,83	1,11
1100	AA Molding Front	2,7	1,8519	1,8519	16,1	17,3	1,2	9302,22	2,65
700-1	H Delta	14,16	0,3531	0,3531	18,4	22,2	3,8	5616,81	1,60
700-2	H Delta tap	14,16	0,3531	0,3531	18,4	22,2	3,8	5616,81	1,60
200	A Sport	149,52	0,0334	0,0334	18,8	24,1	5,3	741,90	0,21
550	H Delta tap-fon	6,5	0,7692	0,7692	19,1	21,4	2,3	7406,00	2,11
Σ								35840,09	10,19

Tabla 6. Cálculo toneladas de refrigeración de moldes método experimental.

6.2 Análisis térmico de los componentes de las inyectoras

6.2.1 Condiciones habituales

Las electroválvulas abren o cierran el paso del agua cuando requieren refrigerar la travesa, intercambiador de aceite y drivers, en el caso de las inyectoras Engel y en el caso de las Lien Yu, la travesa e intercambiador de aceite de manera directa. A la hora de tomar estos datos para el cálculo en condiciones habituales no se forzaron las electroválvulas y las inyectoras se encontraban con las temperaturas estables. En otras palabras, las máquinas están trabajando en condiciones habituales o momentos típicos. Para el caso de las inyectoras 700 se debe de medir los parámetros como se muestra en la **Figura 12**, debido a que la travesa y el intercambiador de aceite están en circuitos independientes.

En la **Tabla 7**, se muestra el cálculo del calor que se debe extraer del agua de refrigeración en cada una de las inyectoras en W y en toneladas de refrigeración trabajando en condiciones habituales por medio de la **Ecuación 3**. En el caso de que las 7 inyectoras de plástico estén en producción, es necesario extraer 69320,90 W. Para extraer esta cantidad de calor en los componentes de las inyectoras, se requiere un sistema de enfriamiento mínimo de 19,71 toneladas de refrigeración en condiciones habituales. Las mediciones se realizaron en diferentes días, esto porque no todas las inyectoras trabajan a la vez, por consiguiente, las temperaturas de entrada varían en cada inyectora.

CONDICIONES HABITUALES - SIN FORZAR VÁLVULAS									
INYECTORA	EQUIPO	TIEMPO [s]	\dot{V} [L/s]	\dot{m} [Kg/s]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	\dot{Q} [W]	TON REF
300	Inyectora	3,21	1,5576	1,5576	16,6	18,7	2,1	13692,52	3,89
400	Inyectora	6,93	0,7215	0,7215	29,2	33,5	4,3	12986,87	3,69
1100	Inyectora	4,02	1,2438	1,2438	16,8	19,1	2,3	11974,88	3,41
700-1	Traversa	17,65	0,2833	0,2833	17,65	19,5	1,85	2193,80	0,62
	Aceite	51,35	0,0974	0,0974	17,8	26,1	8,3	3383,04	0,96
700-2	Traversa	17,65	0,2833	0,2833	17,65	19,5	1,85	2193,80	0,62
	Aceite	51,35	0,0974	0,0974	17,8	26,1	8,3	3383,04	0,96
200	Inyectora	64,16	0,0779	0,0779	17,7	20,6	2,9	946,03	0,27
550	Inyectora	6,2	0,8065	0,8065	15,8	21,3	5,5	18566,94	5,28
Σ								69320,90	19,71

Tabla 7. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras en condiciones habituales.

6.1.2 Condiciones a máxima carga térmica

Para trabajar la inyectora a máxima carga térmica, se suben las temperaturas de la travesa y del aceite, cuando alcance el valor teórico se bajan las temperaturas para forzar a que las electroválvulas se abran y permitan la circulación del agua de refrigeración a los sistemas. En la **Figura 16**, se muestra el símbolo de circulación de la travesa e intercambiador de aceite, lo que significa que todas las electroválvulas están abiertas, con esto se logra que haya transferencia de calor de todos los sistemas al agua.

Para acceder a las configuraciones del panel de las inyectoras Engel con la finalidad de modificar estos ajustes, es necesario tener una tarjeta de acceso nivel 11 que sólo se le suministra al personal calificado. El panel y la tarjeta de acceso se muestra en la **Figura 17**.

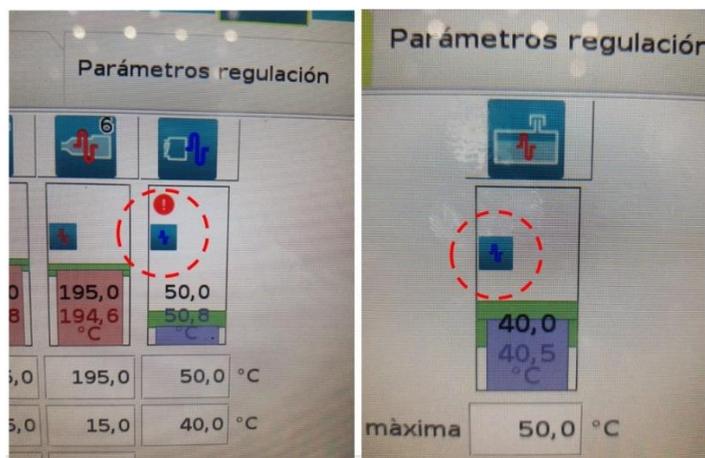


Figura 16. a) Apertura electroválvula de travesa, b) Apertura de electroválvula del intercambiador de aceite

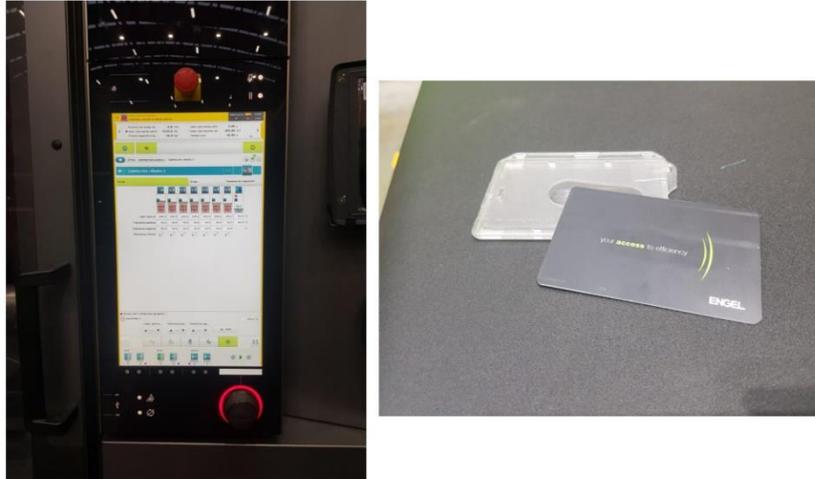


Figura 17. a) Panel inyectora Engel, **b)** Tarjeta de acceso Engel nivel 11.

Una vez se han forzado las electroválvulas de cada inyectora se procede con las mediciones de caudal y temperatura.

En la **Tabla 8**, se muestra el cálculo del calor que se debe extraer del agua de refrigeración en cada una de las inyectoras en W trabajando a carga máxima por medio de la **Ecuación 3**. En el caso de que las 7 inyectoras de plástico estén en producción, es necesario extraer 216044 W. Para extraer esta cantidad de calor en los componentes de las inyectoras, se requiere un sistema de enfriamiento mínimo de 61,43 toneladas de refrigeración en condiciones a máxima carga, es decir, forzando las electroválvulas. Las mediciones se realizaron en diferentes días, esto porque no todas las inyectoras trabajan a la vez, por consiguiente, las temperaturas de entrada varían en cada inyectora.

CARGA MÁXIMA - FORZANDO VÁLVULAS									
INYECTORA	EQUIPO	TIEMPO [s]	\dot{V} [L/s]	\dot{m} [Kg/s]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	\dot{Q} [W]	TON REF
300	Inyectora	6,19	0,8078	0,8078	28,6	33,8	5,2	17582,55	5,00
400	Inyectora	4,03	1,2407	1,2407	16,9	22,2	5,3	27525,81	7,83
1100	Inyectora	6,86	0,7289	0,7289	17,9	29,5	11,6	35391,84	10,06
700-1	Traversa	16,57	0,3018	0,3018	18,2	21,1	2,9	3663,07	1,04
	Aceite	5,47	0,9141	0,9141	18,2	26,5	8,3	31758,50	9,03
700-2	Traversa	16,57	0,3018	0,3018	18,2	21,1	2,9	3663,07	1,04
	Aceite	5,47	0,9141	0,9141	18,2	26,5	8,3	31758,50	9,03
200	Inyectora	3,29	1,5198	1,5198	18,4	21,6	3,2	20357,45	5,79
550	Inyectora	2,36	2,1186	2,1186	19,4	24,4	5	44343,22	12,61
Σ								216044,00	61,43

Tabla 8. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras método calor sensible.

Para el cálculo de toneladas de refrigeración en las inyectoras a máxima carga, también se empleó el método de la primera ley de la termodinámica por medio de las entalpías de la **Ecuación 2**. Se utiliza el software *Engineering Equation Solver* [6], para hallar las entalpías que dependen de las temperaturas de entrada y salida y de la presión. En la **Figura 18**, se muestra la presión medida por un manómetro a en la red de agua de refrigeración de las inyectoras y moldes, esta presión es de 44 PSI o 303,369 KPa.



Figura 18. Presión del circuito de la red de agua de refrigeración.

En la **Figura 19**, se muestran las entalpías calculadas en el software *EES*, para hallar esta variable es necesario ingresar las temperaturas de entrada y salida de cada proceso y la presión de 44PSI o 303,369 KPa.

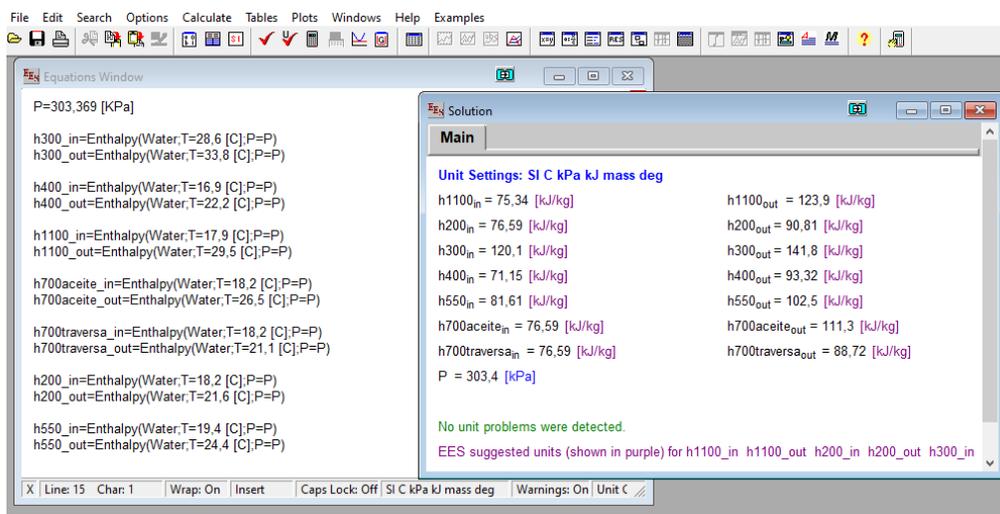


Figura 19. Entalpías del proceso de inyección de plástico.

En la **Tabla 9**, se muestra el cálculo del calor que se debe extraer del agua de refrigeración en cada una de las inyectoras en KW trabajando a carga máxima por medio de la **Ecuación 2**. En el caso de que las 7 inyectoras de plástico estén en producción, es necesario extraer 217,03 KW. Para extraer esta cantidad de calor en los componentes de las inyectoras, se requiere un sistema de enfriamiento mínimo de 61,72 toneladas de refrigeración en condiciones a máxima carga y aplicando la primera ley de la termodinámica. Las mediciones se realizaron en diferentes días, esto porque no todas las inyectoras trabajan a la vez, por consiguiente, las temperaturas de entrada varían en cada inyectora.

MÉTODO PRIMERA LEY TERMODINÁMICA MÁXIMA CARGA - FORZANDO ELECTROVÁLVULAS										
INYECTORA	EQUIPO	TIEMPO [s]	\dot{V} [L/s]	\dot{m} [Kg/s]	ENTALPÍA h1 [KJ/Kg]	ENTALPÍA h2 [KJ/Kg]	Δh [KJ/Kg]	\dot{Q} [KW]	TON REF	
300	Inyectora	6,19	0,8078	0,8078	120,1	141,8	21,7	17,53	4,98	
400	Inyectora	4,03	1,2407	1,2407	71,15	93,32	22,17	27,51	7,82	
1100	Inyectora	6,86	0,7289	0,7289	75,34	123,9	48,56	35,39	10,06	
700-1	Traversa	16,57	0,3018	0,3018	76,59	88,72	12,13	3,66	1,04	
	Aceite	5,47	0,9141	0,9141	76,59	111,3	34,71	31,73	9,02	
700-2	Traversa	16,57	0,3018	0,3018	76,59	88,72	12,13	3,66	1,04	
	Aceite	5,47	0,9141	0,9141	76,59	111,3	34,71	31,73	9,02	
200	Inyectora	3,29	1,5198	1,5198	76,59	90,81	14,22	21,61	6,14	
550	Inyectora	2,36	2,1186	2,1186	81,61	102,5	20,89	44,26	12,58	
Σ								217,07	61,72	

Tabla 9. Cálculo toneladas de refrigeración de inyectoras primera ley de la termodinámica.

6.3 Proyección con nuevas inyectoras de plástico

Para el año 2022 vienen desde Europa dos inyectoras nuevas de plástico de 220 y 550 toneladas de inyección, aproximando los cálculos efectuados de la inyectora 200 a la nueva que llegará de 220 toneladas de inyección, la proyección del balance térmico para las 9 inyectoras de plástico es la siguiente:

- Moldes cálculo teórico $10,66+0,37+1,23=12,26$ TR
- Moldes cálculo experimental $10,19+0,21+2,11=12,51$ TR
- Inyectoras condiciones habituales: $19,71+0,27+5,28=25,26$ TR
- Inyectoras máxima carga método calor sensible: $61,43+5,79+12,61=79,86$ TR
- Inyectoras máxima carga método primera ley de la termodinámica:
 $61,71+6,14+12,58=80,43$ TR

Para garantizar la refrigeración, se trasladó el chiller de 20 toneladas de refrigeración reparado de la planta de SI Ensamblados a la planta de SI Plásticos para la suplir la demanda actual y futura, los dos chiller instalados en la planta de SI Plásticos se muestra en la **Figura 20**. Para evitar las alarmas constantes que se venían presentando, se distribuyeron las cargas hacia los equipos de la siguiente manera: los chillers de 10 y 20 toneladas de refrigeración para refrigerar los moldes y las torres de enfriamiento de 56 y 44 toneladas para refrigerar los componentes de las inyectoras y demás periféricos. Las alarmas por sobrecalentamiento se presentaban debido a que los moldes estaban siendo refrigerados por torres de enfriamiento y los componentes de las inyectoras por medio del chiller de 10 toneladas de refrigeración, según los cálculos térmicos, el chiller no tenía la capacidad para extraer el calor del agua de refrigeración demandado por las inyectoras.



Figura 20. Chiller de 20 y 10 toneladas de refrigeración.

En el caso de los atemperadores y deshumidificadores no se tuvo en cuenta el balance térmico por motivos de producción, además, estos equipos no requieren de mucho calor sensible por extraer, pues el circuito de refrigeración sólo se activa cuando la temperatura de precalentamiento y de deshumidificación sobrepasan 1°C por encima para estabilizarla.

7. CONCLUSIONES

- Las alarmas por sobrecalentamiento de las inyectoras se debieron a que los componentes de las inyectoras como travesa, intercambiador de aceite y drivers estaban conectados sólo al chiller de 10 toneladas de refrigeración y los demás equipos a torres de enfriamiento.
- La distribución de cargas adecuada para extraer el calor se debe hacer de manera que los moldes se refrigeren con los chiller de 10 y 20 toneladas de refrigeración y las inyectoras por medio de las torres de enfriamiento.
- Para refrigerar todos los moldes, en caso de que todos estuvieran trabajando en simultáneo con refrigeración, son necesarias **10,66** toneladas de refrigeración para el caso teórico y para el cálculo experimental **10,19** toneladas de refrigeración
- Para refrigerar todas las inyectoras trabajando en condiciones habituales, es decir, sin forzar las electroválvulas y una temperatura estable para aceite y travesa de la máquina, son necesarias **19,71** toneladas de refrigeración
- Para refrigerar todas las inyectoras trabajando a máxima carga, es decir, a carga nominal son necesarias **61,43** toneladas de refrigeración por el método de calor sensible y **61,71** toneladas de refrigeración por el método de la primera ley de la termodinámica.
- Las dos torres de refrigeración de 56 y 44 toneladas de refrigeración nominal y los 2 chiller de 20 y 10 toneladas, son suficientes para cumplir con la demanda de extracción de calor, incluso con la llegada de las nuevas inyectoras de plástico de 220 y 550T
- Se recomienda la compra de equipos como los caudalímetros para la medición de caudales y así obtener resultados más precisos

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). Termodinámica (7.a ed.). McGraw-Hill Education.

[2] Arnabat, I. (2018, 17 agosto). ¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? Funcionamiento y seguridad. caloryfrio. Recuperado de <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html>

[3] R.C.G. (2017, 21 julio). Chillers, aspectos técnicos. Ogrados. Recuperado de <https://0grados.com.mx/chillers-aspectos-tecnicos/>

[4] Pérez, J. (2015). Partes de una Inyectora de Plástico | Inyectoras de plástico.

portalelectromecánico. Recuperado de

http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/inectoras/partes_de_una_inyectora_de_plastico.html

[5] Zavaleta, M. (s. f.). FUNCIONAMIENTO DE UN DESHUMIFICADOR PARA PLÁSTICOS. moldeoporinyeccion. Recuperado de

<https://moldeoporinyeccion.com/funcionamiento-de-un-deshumificador-para-plasticos/>

[6] Engineering Equation Solver (9.944-3D). (2015). [Software]. S.A. Klein.

<https://fchartsoftware.com/ees/>