

Trabajo Fin de Grado

ALTERNATIVAS PARA EL CALENTAMIENTO DE
MOLDES EN PROCESOS DE FUNDICIÓN POR
GRAVEDAD EN ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO.

Realizado por:

Andrés Ramírez Sánchez

Dirigido por:

Cristóbal Cortés Gracia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2019

ALTERNATIVAS PARA EL CALENTAMIENTO DE MOLDES EN PROCESOS DE FUNDICIÓN POR GRAVEDAD EN ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO.

0. RESUMEN

Tras una breve introducción en el capítulo 1 sobre el contexto, objetivos y alcance de este proyecto el lector podrá encontrar el contenido de este proyecto dividido en cuatro partes:

- A lo largo del capítulo 2 se describe cualitativamente y se comenta fundamentos básicos sobre los procesos de fundición junto con todos los componentes y utillajes más importantes y básicos en fundiciones de aluminio. Asimismo, se profundizará levemente en el proceso de calentamiento del molde (tema esencial para el desarrollo de este proyecto), los parámetros más importantes durante el calentamiento y la metodología a seguir para poder analizar cuantitativamente los parámetros comentados previamente.
- Una vez desarrollada la metodología de análisis, en el capítulo 3 se aplica el planteamiento propuesto en el capítulo anterior y se desarrolla más ampliamente todos los cálculos y resultados, a fin de conocer valores de eficiencia y calor transmitido entre otros. Finalmente, tras tener una estimación de los valores más representativos del proceso de calentamiento, se propondrán 3 alternativas distintas con respecto a la actual.
- Finalmente, a lo largo del capítulo 4 se concluye desarrollando dos partes: por un lado, las conclusiones obtenidas del análisis realizado en el capítulo anterior y posibles mejoras que se pueden realizar a la hora de implementar un cálculo más preciso con respecto del realizado. Por otro lado, se realiza una pequeña discusión comparativa entre los 3 métodos y el actual, concluyendo al final con el método alternativo más adecuado.

ÍNDICE

0. RESUMEN	i
1. INTRODUCCIÓN	iv
1.1. CONTEXTO	iv
1.2. OBJETIVOS	vi
1.3. ALCANCE.....	vii
2. LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN.....	1
2.1. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE FUNDICIÓN.....	1
2.2. PRINCIPALES ELEMENTOS EN FUNDICIÓN EN MOLDEO EN COQUILLA CON MACHO DE ARENA	1
2.3. PROCESO DE CALENTAMIENTO DEL MOLDE.....	7
2.3.1. COMPONENTES Y ETAPAS DEL CALENTAMIENTO.....	7
2.3.2. PLANTEAMIENTO ANALÍTICO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO	10
2.3.2.1. APROXIMACIÓN DEL INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN	10
2.3.2.2. APROXIMACIÓN DEL INTERCAMBIO DE CALOR POR CONVECCIÓN	13
2.3.2.3. ESTIMACIÓN COMO CAPACIDAD TÉRMICA AGRUPADA.....	15
2.2.3. EL PROBLEMA DE LA EFICIENCIA EN LOS QUEMADORES.....	17
3. ANÁLISIS DEL PROCESO	18
3.1. RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DE RADIACIÓN.....	18
3.2. RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DE CONVECCIÓN	19
3.3. OBTENCIÓN DE CALOR TOTAL INTERCAMBIADO Y COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.....	20
3.4. RESULTADOS DE CALOR INTERCAMBIADO	22
3.5. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS.....	23
3.5.1. ALTERNATIVA 1: CALENTAMIENTO INDUCTIVO.....	23
3.5.2. ALTERNATIVA 2: QUEMADORES POROSOS.....	24
3.5.3. ALTERNATIVA 3: CALENTAMIENTO RESISTIVO	26
4. CONCLUSIONES.....	27
4.1. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS.....	27
4.2. CONCLUSIONES DE CADA ALTERNATIVA.....	28
4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ALTERNATIVA	30
5. BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXOS	
ANEXO 1. Tabla de clasificación de los procesos de fundición	
ANEXO 2. Descripción de armario de gas.....	
ANEXO 3. Descripción y tabla de productos de poteyage	
ANEXO 4. Distribución de línea de producción.....	
ANEXO 5. Propiedades térmicas del Acero 1.2343	
ANEXO 6. Calidad del gas natural.....	

ANEXO 7. Plano de boquilla de salida quemador lateral	
ANEXO 8. Geometría del molde	
ANEXO 9. Rampas de calentamiento	
ANEXO 10. Estimación de la emisividad del molde.....	
ANEXO 11. Estimación temperatura superficie del molde	
ANEXO 12. Tabla de coeficientes de conducción transitoria	
ANEXO 13. Selección de $T_{AD\ LLAMA}$ en función del exceso de aire	
ANEXO 14. Croquis de mechero lateral	
ANEXO 15. Clasificación de los procesos de fundición	
ANEXO 16. Defectología en procesos de fundición. principales defectos	
ANEXO 17. Cálculo de los coeficientes de convección.....	
ANEXO 18. Cálculo del número de Biot y Fourier	
ANEXO 19. Cálculos necesarios para el cálculo de la eficiencia.....	
ANEXO 20. Planteamiento de números adimensionales y parámetros necesarios.....	

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO

Este estudio está dedicado a los procesos de fundición de aluminio basados en sistemas de producción por moldeo en coquilla por gravedad. Como vamos a observar a lo largo de este estudio, el proceso presenta problemas y es susceptible de mejora. Nos vamos a centrar en un procedimiento específico que genera problemas reales, ya no solo en el ámbito de la producción industrial o energético, sino también un ámbito de ergonomía y salud laboral.

ALUMALSA (Aluminios y Aleaciones, Sociedad Anónima) es una empresa de tipo TIER II (empresas encargadas de dar valor a la materia prima para convertirla en productos acabados o semiacabados para formar parte de un producto final) con producción en serie de piezas de aluminio fundido y mecanizado posterior para el sector del automóvil (numerosas empresas de automoción como Ford, Audi o Renault). Además, es un proveedor en la industria del automóvil de alta competitividad, debido a la demanda y el comportamiento fluctuante de este mercado. Asimismo, en este tipo de industrias, donde la productividad es el objetivo principal, se observa claramente que la seguridad es una prioridad ante cualquier factor, lo cual es un punto primordial para tener en cuenta a la hora de establecer nuestro nuevo modelo.

Con respecto al producto que se está fabricando y al que va dirigido este trabajo, se trata de una pieza perteneciente a una familia de 9 piezas similares entre sí (designación 3-583.XX), las cuales pertenecen al cliente *Borgwarner Turbos System*, el cual se encarga de realizar el ensamblado completo del turbocompresor y enviárselo al cliente definitivo. Este estudio va a ir dedicado a esta pieza en especial, lo cual supone que muchos de los parámetros y resultados que se obtienen no se puedan extrapolar a otras aplicaciones, debido al alto grado de especificación que esta pieza supone y, por ende, los medios de producción empleados. No obstante, el proyecto intenta establecer una metodología de estudio y pruebas válidas para el problema en general.

Con respecto al *producto definitivo ensamblado* junto con el resto de los componentes, este turbocompresor forma parte del motor diésel 6 cilindros OM 656 de los modelos Mercedes-Benz S-350 d y S-400 d. Este motor es de especial importancia dado que se caracteriza por ser el motor diésel más potente jamás fabricado por Mercedes-benz¹ con 250 KW (340 HP) de potencia y 700 N·m de par.

Además, dicho ensamblaje constituye un sistema biturbo secuencial, son dos turbos, generalmente unidos por una misma estructura, en la que primero entra un turbo en un determinado rango de revoluciones, por ejemplo, desde 2.000 a 4.000 rpm, y después entra el segundo turbo totalmente cargado, dándole la potencia añadida que le falta. En este caso, este último entraría a las 4.000 rpm hasta el límite.

¹ <https://www.daimler.com/innovation/diesel/om656-2.html>

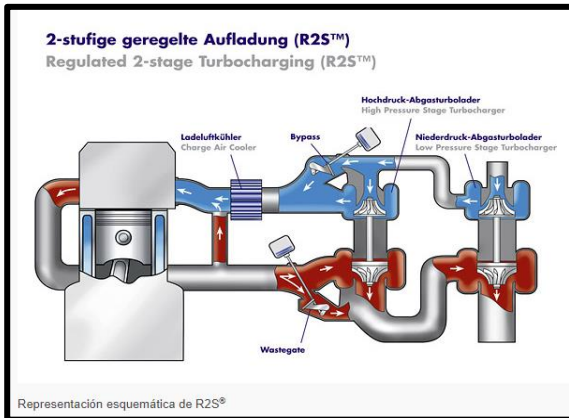


Figura 1. Esquema explicativo del sistema sobrealimentado con dos etapas.
 [Fuente]: <http://www.turbos.bwauto.com/es/products/r2s.aspx>

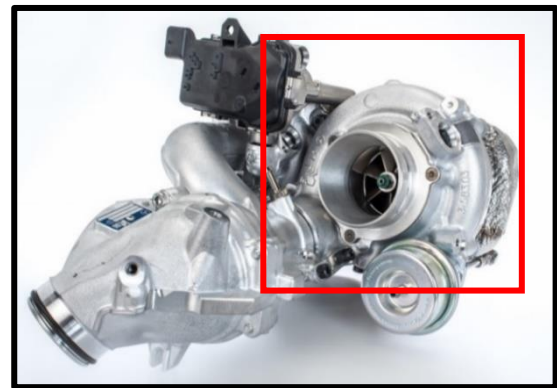


Figura 2. Sistema R2S.
 [Fuente]: <http://www.turbo.borgwarner.com/es/press/newsArticle.aspx?id=552>

Finalmente, ya no sólo la motivación económica y energética es las que me empujan a llevar a cabo este trabajo, sino en la fuente de accidentes y riesgos que supone esta metodología. Además, con este proyecto se plantea una posible forma de resolver problemas de manera real que afectan diariamente a los empleados de esta industria, y que obviamente, puede ser una solución a largo plazo, ya no sólo a esta empresa en cuestión, sino al mundo de las fundiciones, puesto que actualmente se trata de una solución sencilla y barata, empleada en la mayoría de las industrias de este ámbito.

1.2. OBJETIVOS

1. Plantear una descripción teórica superficial de los procesos de fundición y los componentes más importantes en la fundición en molde de coquilla por gravedad.
2. Explicar globalmente el ciclo de trabajo y focalizarse en la etapa de calentamiento del molde.
3. Proponer un análisis de la situación actual del calentamiento de moldes en la empresa ALUMALSA mediante el estudio de algunos parámetros críticos del proceso.
4. Plantear conclusiones sobre estimaciones de consumo energético y económico.
5. Ofrecer una estimación sobre el consumo de combustible y calor introducido en el molde, aplicando los conocimientos sobre transferencia de calor y mecánica de fluidos, haciendo uso de las referencias y fuentes que se vean necesarias de forma correcta.
6. Obtener datos e información dentro de la empresa y proveedores de material a fin de poder realizar un análisis completo.
7. Observar cómo varían las propiedades del molde conforme vamos aumentando la temperatura hasta llegar a la temperatura de trabajo y ver cómo es la distribución de esta a lo largo del volumen del molde durante la etapa del ciclo de trabajo elegida.
8. Investigar y buscar en el mercado actual posibles alternativas y métodos para calentar moldes y adaptarlos a la actual metodología y empleo utilizada en la empresa. Asimismo, elegir 3 métodos que mejor cumplan los requerimientos demandados.
9. Contactar con proveedores reales e intentar obtener información técnica sobre el método escogido.
10. En relación con los 3 métodos elegidos, realizar una comparación acorde con los parámetros obtenidos en el análisis previo que nos permite ver las ventajas y desventajas de cada alternativa. Para ello, utilizar gráficas, imágenes y esquemas para implementar la descripción buscando así la forma más visual posible de transmitir este mensaje.

1.3. ALCANCE

Con el fin de llegar a los objetivos planteados, la metodología que vamos a llevar a cabo consiste en plantear, en primer lugar, una descripción cualitativa de cómo y cuáles son los componentes que se involucran en todo el proceso de calentamiento, haciendo hincapié en aquellos más importantes y como afecta este estudio sobre los mismos.

Tras haber obtenido una comprensión general del proceso, etapas y componentes, se procederá a un análisis del proceso de calentamiento del molde viendo si realmente la distribución de temperatura es uniforme, como se distribuye por el molde y algunos parámetros críticos que se ven involucrados en este proceso y su evolución a lo largo del tiempo. Esto se realiza mediante la medición in-situ de algunos parámetros en fábrica (cuyos datos se anexarán) y otros será necesario tomar estimaciones debidamente razonadas. Una vez hecho esto, propondremos un balance energético del proceso de intercambio de calor e intentar llegar a algunos resultados.

Una vez hecha esta primera parte, continuamos con la búsqueda dentro del mercado del calentamiento de moldes con el objetivo de obtener 3 métodos que nos ofrezcan mejores prestaciones que las actuales. Para ello, contactaremos con los proveedores para que nos proporcionen la información suficiente para realizar una comparación adecuada en la medida de lo posible. Asimismo, se comentarán los principales problemas a los que nos hemos enfrentado a lo largo de dicho análisis.

Finalmente, tras haber finalizado nuestro análisis y obtener la información pertinente sobre cada método, plantearemos cuantitativa y cualitativamente una comparación de parámetros críticos y costes con respecto la situación actual, empleando para ello herramientas de software como Microsoft Excel y EES para obtener todos los datos, cálculos necesarios y reflejarlos de forma adecuada.

2. LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE FUNDICIÓN

La fundición o moldeo es un proceso de fabricación en serie de productos sin arranque de viruta, basado en la fusión de metales combinándolos entre sí en una proporción adecuada. Esta proporción aportará propiedades mecánicas, químicas o eléctricas al producto final en función del objetivo deseado.

Básicamente, este proceso consiste en la dosificación de la aleación elegida en estado líquido dentro de un **molde metálico, de arena** u otros materiales, en el cual se encuentra una **huella o negativo** de la forma de la pieza en negativo que queremos obtener (en el *anexo 15*, se explica detenidamente la diferenciación de estos procesos). Una vez hecho esto, se deja un tiempo adecuado de enfriamiento o solidificación. Finalmente, completado el enfriamiento, se continúa a la extracción de la pieza del molde.

2.2. PRINCIPALES ELEMENTOS EN FUNDICIÓN EN MOLDEO EN COQUILLA CON MACHO DE ARENA

A lo largo de este apartado se van a explicar los componentes y procesos más importantes e imprescindibles que aparecen durante el proceso de moldeo en coquilla

1.- **Aleación:** se trata del metal fundido el cual se va a introducir dentro del molde para que solidifique y genere así la pieza deseada. Asimismo, la aleación elegida para esta pieza en cuestión es $AlSi_9Cu_3$. Este compuesto es una combinación de Aluminio-Silicio, materiales elegidos por:

- *Aluminio* (baja densidad, alta resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y buenas propiedades mecánicas)
- *Silicio* a fin de reducir la temperatura de fusión del aluminio entre otras funciones. Por lo general, se suele añadir entre un 11,7% a 12,7%² dependiendo del tiempo de enfriamiento, (a mayor tiempo de enfriamiento, mayor será la concentración de Silicio).
- *Cobre*, a fin de mejorar sus características mecánicas. En la siguiente figura se puede observar el diagrama de equilibrio Al-Si, donde en el punto eutéctico es donde se reduce la temperatura de fusión.

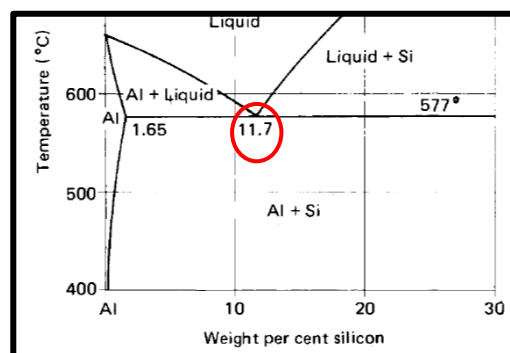


Figura 3. Diagrama de fases Al-Si.

[Fuente]: Die casting metallurgy, Allan Kayne & Arthur Street, 1st edition (1982). Capítulo 1.

² Die casting metallurgy, Allan Kayne & Arthur Street, 1st edition (1982). Capítulo 4.

- También se pueden encontrar otros aleantes como *Manganeso* (mejorar la soldabilidad) o *Titanio* (mejorar el mecanizado), en menores proporciones.

Los componentes, características y propiedades de esta aleación proceden de la norma *UNE-EN 1706:2011 Aluminio y aleaciones de aluminio*, con el fin de ofrecer un producto estándar y acorde a los criterios de calidad que la misma ofrece.

Es importante destacar que, generalmente, se busca que el metal fundido tenga una viscosidad semejante a la del agua ($\mu_{AGUA} = 1 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$) a fin de que fluya dentro del molde evitando flujo turbulento. Es por ello que, se suele mantener a unos 700 °C en estado líquido, si bien, dicha temperatura depende de cada proceso.

2.- **Pieza:** se trata de nuestro producto final obtenido tras todo el proceso de fundición. Esta pieza corresponde a un molde de 2 huellas por cada puesto en la línea de producción, de tal forma que surgirán 2 piezas por molde. Dicha pieza se puede observar en las *figuras 5 y 6*.

Por otro lado, es importante comentar las partes genéricas que suelen componer una pieza de fundición de las cuales se desechan una gran mayoría, puesto que sólo son funcionales durante el proceso de fundición. Una vez concluido el proceso de solidificación, estas piezas residuales se cortan y refunden (diversificando cada pieza acorde a su aleación) junto con las piezas de rechazo generadas y la viruta restante del mecanizado de la misma aleación.

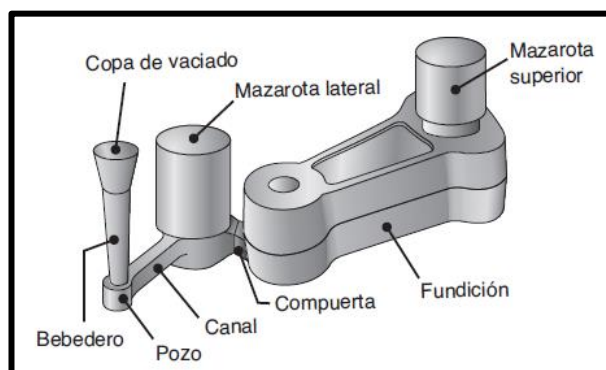


Figura 4. Partes de una pieza de fundición en molde de arena.

[Fuente]: *Manufactura, Ingeniería y Tecnología- Serope Kalpakjian y Steven Schmid 5ta Edición.*

En la *figura 4* se muestran las partes que componen una pieza fundida en molde de arena, cuya geometría suele ser más simple con respecto a las piezas fundidas en moldes de metal, ya que no se puede controlar tanto la solidificación.

Para el proceso de fundición y nuestra pieza en cuestión, las partes más importantes son:

- **Bebedero:** cilindro cónico que aporta velocidad al fluido debido al cambio de sección. al ser la parte de entrada del metal líquido nos interesa que sea una de las zonas donde se acumule gran cantidad de calor, y, por ende, se permita al metal líquido fluir adecuadamente.
- **Mazarota:** elemento que posee un gran volumen para permanecer durante la mayor parte de la solidificación a alta temperatura y, por tanto, con gran cantidad de aluminio líquido el cuál alimentará a la pieza. Asimismo, los parámetros geométricos de este elemento son críticos, porque va a ser el lugar donde van a ir a parar los

rechupes (o éste es uno de sus objetivos principales), ya que la tendencia habitual es la generación de rechupes en puntos con mayor temperatura. Cuanto más aislante sea la aleación, menor tamaño tendrá este elemento. En la *figura 5*, esta parte corresponde al *número 3*.

- **Canal:** vaso comunicante entre el bebedero y otras partes de la pieza a moldear si existen.

Con respecto a la pieza en sí, podemos encontrar diferentes partes importantes a la hora de plantear la forma en la que vamos a fundir. No se trata de un término técnico, pero es importante destacar dos partes críticas en piezas de fundición:

- **Mamelones:** zona de la pieza con alta cantidad de masa de metal que tras la fundición se generará una rosca. Estas zonas son de alta importancia porque, al ser unos puntos donde se concentra mucha masa de metal, y, por tanto, alta temperatura, es un foco de concentración de rechupes. En la *figura 5*, corresponde al *número 1*.
- **Eyectores:** son zonas colocadas estratégicamente en la huella del molde para permitir el desmoldeo de la pieza una vez ha sido solidificada. Como es lógico, al estar en el molde, también se verán en la pieza. En nuestra pieza (*figura 6* corresponden al *número 2*), tenemos bastantes.

En las siguientes imágenes se observan las partes previamente comentadas:

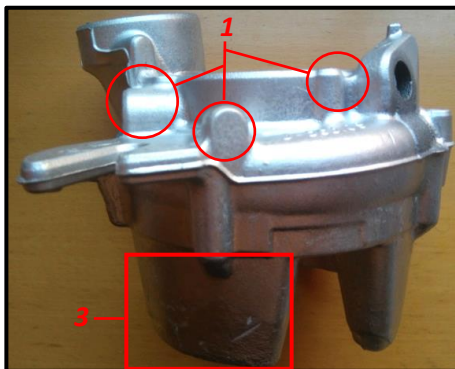


Figura 5. Vista en perfil de la pieza.
[Fuente]: realizada por el autor (18/06/2019).

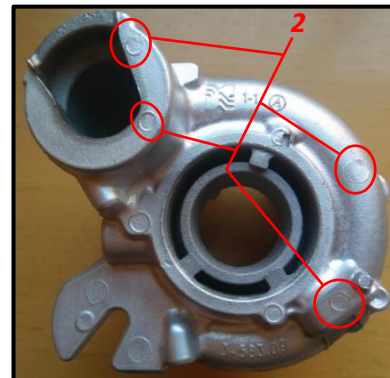


Figura 6. Vista superior de la pieza.
[Fuente]: realizada por el autor (18/06/2019).

3.- **Molde metálico:** es el ensamblaje que da forma a la pieza. Es una parte crítica donde podemos encontrar numerosas piezas móviles y fijas. Generalmente está compuesto de acero refractario, donde están mecanizadas las dos huellas o negativos de la pieza. En nuestro caso, se trata de un acero para trabajo en caliente con sus propiedades presentes en el *anexo 5*. Por otro lado, se busca un diseño estanco, a fin de que el metal líquido no escape por ningún lado generando así rebabas innecesarias. Principalmente, está compuesto por:

- **Zapata o macho superior/inferior:** es el molde en sí, donde se encuentran mecanizadas las huellas o negativos que conformarán la pieza deseada junto con los otros elementos añadidos a la pieza para permitir su moldeo. Esta parte será aquella en la que centraremos nuestro estudio.

- **Placa de expulsión:** placa situada debajo del macho inferior, cuya función es extraer la pieza mediante un cilindro hidráulico que desplaza toda la placa. Básicamente, realiza la acción de desmoldeo, a fin de ayudar en la ergonomía del puesto haciendo que el operario no tenga que despegar la pieza del molde, sino que sean unos *eyectores* (pernos templados de tolerancias controladas), los encargados de extraer la pieza del molde. Dicha placa va atornillada mediante tornillos *allen* conocidos como *columns*.
- **Cazo:** depósito normalmente con recubrimiento cerámico y previamente *poteyado*³ con pintura aislante, donde se introduce el volumen de metal líquido equivalente a toda la pieza en bruto para su posterior introducción en el molde mediante el basculamiento de este. Se puede observar en la *figura 12*.
- **Portada:** hendidura mecanizada en el molde cuya función es doble: apoyo del macho de arena y circuito de corrientes de aire para los gases generados durante la solidificación al contactar con el macho.
- **Cáncamo:** utillaje roscado al cuerpo del molde (normalmente son 4, cada uno en una esquina del molde) acabado en una circunferencia para permitir su transporte mediante puente grúa.

Otras partes opcionales que suelen surgir en la puesta en marcha de la línea en producción. Estas partes se añaden al diseño inicial del molde obtenido tras las simulaciones en ordenador.

- **Venturi:** tubo en forma de T insertado en un lugar específico del molde donde existe un exceso de temperatura indeseado. Para solucionarlo, se coloca una entrada de aire en un momento determinado de la solidificación a una presión determinada para la correcta refrigeración del molde y, reducir los defectos debidos a temperatura en ese punto específico. Se puede observar en la *figura 7*.
- **Filtro:** rendijas de circulación de los gases generados tanto en el macho como en el molde de manera que reduce la presión y ayuda a la recirculación de gases generados por el choque térmico entre el macho y el metal líquido. Por lo general, se colocan en zonas de apoyo de macho y molde. Se puede observar en la *figura 9*, correspondiente a una pieza, y en la *figura 10*, en el molde.
- **Vientos:** acanaladuras mecanizadas en el molde con dos funciones principalmente: reducir la presión dentro del mismo y evacuar los gases generados. Se pueden apreciar en la *figura 10* de la página siguiente.

³ El *poteyage* es el proceso de pintado de la superficie de los moldes con componentes específicos a fin de alargar su vida útil. Se aporta información más profunda en el punto 6 de este apartado.



Figura 7. Venturi insertado en molde.
[Fuente]: realizada por el autor (21/05/2019).



Figura 8. Chimenea para molde.
[Fuente]: realizada por el autor (24/05/2019).



Figura 9. Filtro marcado en pieza.
[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).

- Chimenea:** son surcos mecanizados con tolerancias determinadas (0,2 mm) que se realizan en pernos para que fluya por ahí el aire, y así reducir la presión. Para su posible uso se debe realizar un orificio de tolerancias determinadas en el molde donde se generan sobrepresiones. Una muestra de ello lo podemos comprobar en la *figura 8*. A pesar de incluir huecos en el molde por los cuales se puede colar el metal, debido a las propiedades de la aleación en estado líquido, ésta no es colable en espacios inferiores a 0,2 mm.

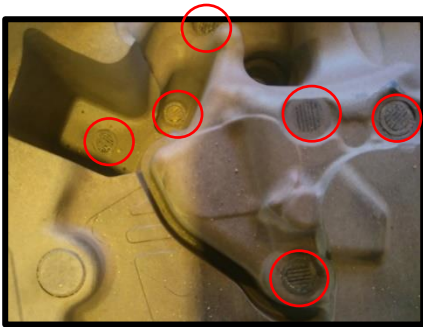


Figura 10. Huella de molde destacando los filtros.
[Fuente]: realizada por el autor (11/06/2019).

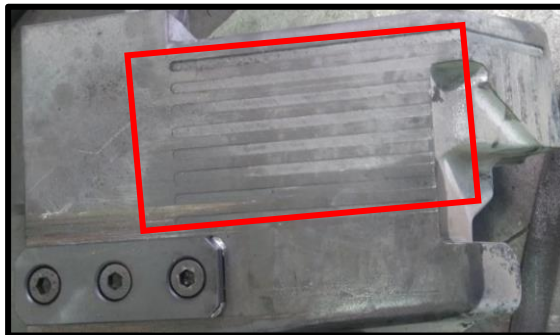


Figura 11. Vientos mecanizados en molde.
[Fuente]: realizada por el autor (11/06/2019).



Figura 12. Cazo del molde.
Fuente]: realizada por el autor (10/06/2019).

4.- **Macho de arena:** pieza o piezas (el número depende de la geometría interna que tienen que reproducir) encargadas de generar el hueco interno de una pieza moldeada impidiendo así que el metal llene dicho volumen.

Estas piezas están compuestas por arena de sílice y pre-revestida con resina, la cual, durante el proceso de fabricación de los machos, se aplica amina para acelerar el proceso de curado entre la resina y la arena a fin de que ofrezca la suficiente resistencia y rigidez para ser manipulado, y, obviamente, aguante la temperatura al contacto con el metal líquido.

Una de las principales causas de aumento de rechazo en producción se trata de la explosión de machos, la cual se comenta en el *anexo 16*.

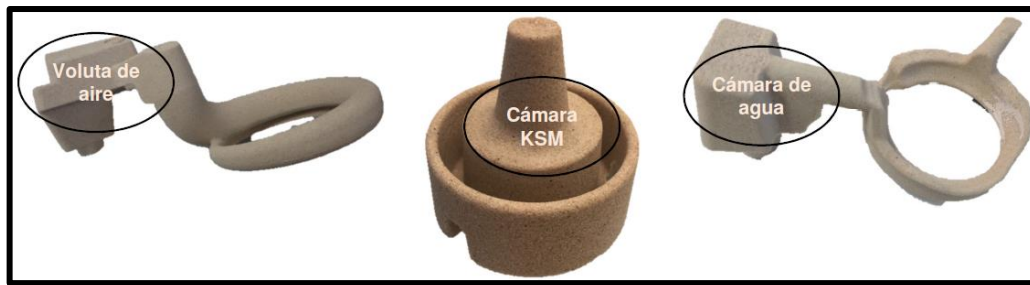


Figura 13. Los tres machos de arena de la pieza 3-583.09.
[Fuente]: documento interno.

5.- **Poteyage**: se trata del procedimiento de pintado de los moldes a fin de alargar la vida de estos. Se trata de una palabra procedente del francés definido como: “En metalurgia, la acción de aplicar un recubrimiento líquido a la superficie de un molde o crisol metálico”⁴ (esta palabra no pertenece al lenguaje castellano). En *anexo 3* se hace una descripción más detallada de las etapas en el proceso de poteyage.

En la siguiente figura, se observa el poteyage de uno de los moldes donde se funden las piezas que comentamos. En este caso se ha aplicado un color azul, donde según el *anexo 3*, se trata de un componente muy aislante, al ser esa zona las mazarotas de la pieza.

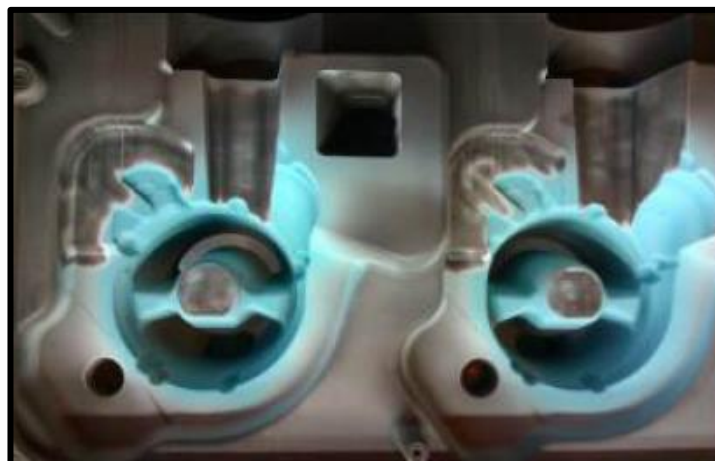


Figura 14. Molde poteyado.
[Fuente]: realizada por el autor (7/06/2019).

6.- **Otros elementos**: bastidor, horno fusor, horno de mantenimiento....

El **bastidor** es el soporte del molde que se encargará de voltearlo 90°, con el fin de que el metal líquido llene la huella o negativo mecanizada en el molde. Esto conlleva un mayor control en algunos parámetros de fundición como tiempo de solidificación o tiempo de basculamiento.

Una vez conocemos las partes que entran en juego durante el proceso de producción de esta pieza, en el *anexo 16* se procede a explicar los principales defectos que se pueden generar en esta pieza, que nos gustaría reducir (dentro de lo posible) con las posibles alternativas que proponemos al final del capítulo 4.

⁴ <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/poteyage/63007?q=poteyage#62296>

2.3. PROCESO DE CALENTAMIENTO DEL MOLDE

Como se explicará a lo largo de este apartado, el calentamiento del molde es un proceso complejo de alto gasto energético que corresponde a una pequeña parte de todo el ciclo de trabajo que conlleva la producción de esta pieza. Para ello, se va a explicar, en primer lugar, cualitativamente como es el proceso de calentamiento y, a continuación, se plantean las ecuaciones que estiman aproximadamente la manera en la que el molde se calienta. Las principales herramientas analíticas que utilizaremos serán ecuaciones de transferencia de calor y números adimensionales.

2.3.1. COMPONENTES Y ETAPAS DEL CALENTAMIENTO

Una vez explicadas todas las etapas del ciclo de trabajo en la línea de producción desarrolladas en el *anexo 21*, nos centramos en el calentamiento el cual se realiza mediante la combustión de gas natural con quemadores diseñados y fabricados propiamente en el taller de la fábrica.

Con respecto a los quemadores, dos de ellos (mecheros laterales) están fijos en el bastidor y el restante (mechero de precalentamiento), es móvil y se coloca sólo en el momento en el que el molde se encuentra por debajo de la temperatura consigna, en la etapa de precalentamiento (observar *figuras 17 y 18*). A continuación, se presenta una breve descripción de la tipología de quemadores previa a la propia explicación de los quemadores en la línea de producción, los cuales pueden ser de dos clases: *de premezcla* y *de no premezcla*⁵.

- a. **Quemadores de premezcla:** para explicar esta tipología de quemadores resulta útil el empleo como ejemplo de los *mecheros Bunsen* de laboratorio, donde el combustible entra por la parte inferior y el aire entra por unos orificios situados por encima de la entrada de combustible generando así una caída de presión que junto al propio flujo de gas permite la entrada de aire. En la *figura 16* se puede apreciar claramente como el tubo principal de gas natural (válvula de color azul), se le introduce de manera adyacente el tubo de aire desde la red de distribución.

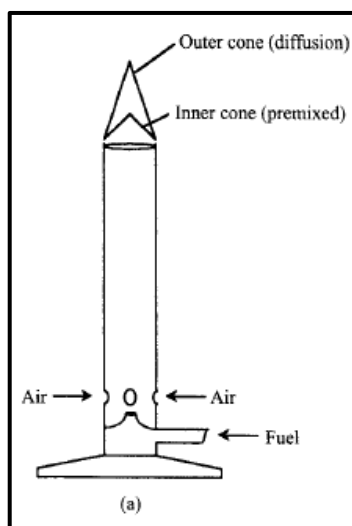


Figura 15. Mechero Bunsen.

[Fuente]: S.R.Turns, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill Education, 2000. Capítulo 8. Figura 8.3.a.

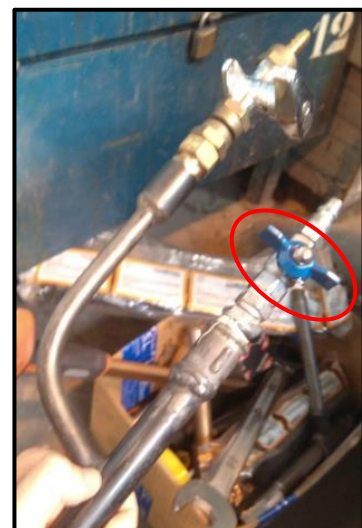


Figura 16. Mechero de premezcla.

[Fuente]: realizada por el autor (28/05/2019).

⁵ S.R.Turns, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill Education, 2000. Capítulo 8.

- b. Quemadores de no premezcla:** este tipo de quemadores se caracterizan por una única entrada por el quemador de combustible, y a la salida del quemador aire en condiciones atmosféricas, de tal manera que la mezcla se realiza a la salida. El empleo de estos quemadores es más común debido a que son menos peligrosos, debido a que la mezcla de aire y combustible se realiza a la salida del mechero.

Una vez explicado la tipología de los quemadores, a continuación, se presentan los quemadores localizados en la línea.

- **Mechero de precalentamiento:** sucesión de tubos soldados de acero inoxidable cuyo diseño va acorde a la huella del molde para dirigir el flujo de calor a puntos específicos de la huella, donde se quiere mantener una temperatura determinada. Este tipo de mechero es un *quemador no premezcla*. Cabe destacar que los agujeros de escape del gas se realizan mediante taladros en la superficie del quemador con una *rosca métrica de 10 mm*. En la *figura 16 y 17* se puede observar dicho taladros y como este mechero va dedicado concretamente a la geometría del molde partiendo del modelo teórico hasta el modelo real, donde se busca un diseño aproximadamente ergonómico.
- **Mecheros laterales:** mecheros de premezcla simétricos uno con respecto del otro (*figuras 18 y 19*) colocados en los laterales del bastidor con el objetivo de mantener la temperatura del molde dentro de los rangos establecidos. Además, están controlados mediante electroválvulas previamente configuradas durante la puesta a punto de la línea de producción, cuyo origen se encuentra en un denominado “armario de gas”. En éste se lleva a cabo la mezcla de aire y gas, donde se acumulan todos los componentes que entran en juego a la hora de controlar los caudales tanto de aire como combustible desde la red. Para una mayor claridad, consultar el *anexo 2*, donde se explica el funcionamiento de la línea y los caudales enviados a los mecheros.

El funcionamiento de esto mecheros está regido por electroválvulas de tal forma que el calentamiento puede ser dos formas distintas:

1. **Llama alta:** salida únicamente de gas con caudal alto. Se llega en el momento que el molde se encuentra por debajo del margen inferior establecido durante la puesta a punto de la línea.
2. **Llama baja:** salida de mezcla gas y aire con caudal bajo. Esta situación tiene como objetivo una “llama de mantenimiento”, a fin de que el mechero no se apague o el operario tenga que encender la llama de nuevo.



Figura 17. Modelo real de mechero de precalentamiento.
[Fuente]: realizada por el autor (14/06/2019).

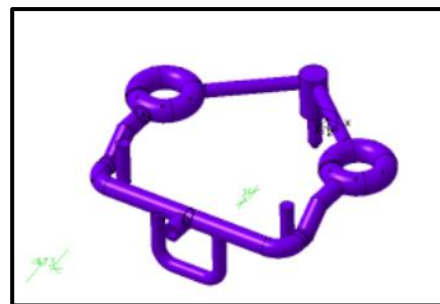


Figura 18. Modelo virtual de mechero de precalentamiento.
[Fuente]: Software CATIA v4.



Figura 19. Mechero lateral derecho.
[Fuente]: realizada por el autor (14/06/2019).



Figura 20. Mechero lateral izquierdo.
[Fuente]: realizada por el autor (14/06/2019).

Por lo tanto, para explicar el funcionamiento de este proceso de una manera más sencilla, podemos pensar análogamente como el funcionamiento de un *termostato*.

En nuestro caso, los límites establecidos son el margen superior de 400°C, margen inferior de 280°C y una temperatura consigna de 350°C. Es por ello que podemos establecer dos estados posibles:

1. **Pre calentamiento**, desde los 280 °C a los 350 °C, donde tenemos instalado el mechero de pre calentamiento y los mecheros laterales en llama alta (etapa del ciclo con mayor consumo). Este periodo corresponde a un tiempo previo al ciclo de trabajo de la línea de producción.
2. **Mantenimiento de llama**, se busca una llama mínima para, en el caso de bajar de la consigna, cambiar al estado de llama alta y entrar en la etapa anterior. Esta fase se da durante el ciclo de trabajo.

A continuación, se presenta un esquema explicativo donde se describe gráficamente el funcionamiento del calentamiento del molde durante la producción o ciclo de trabajo:

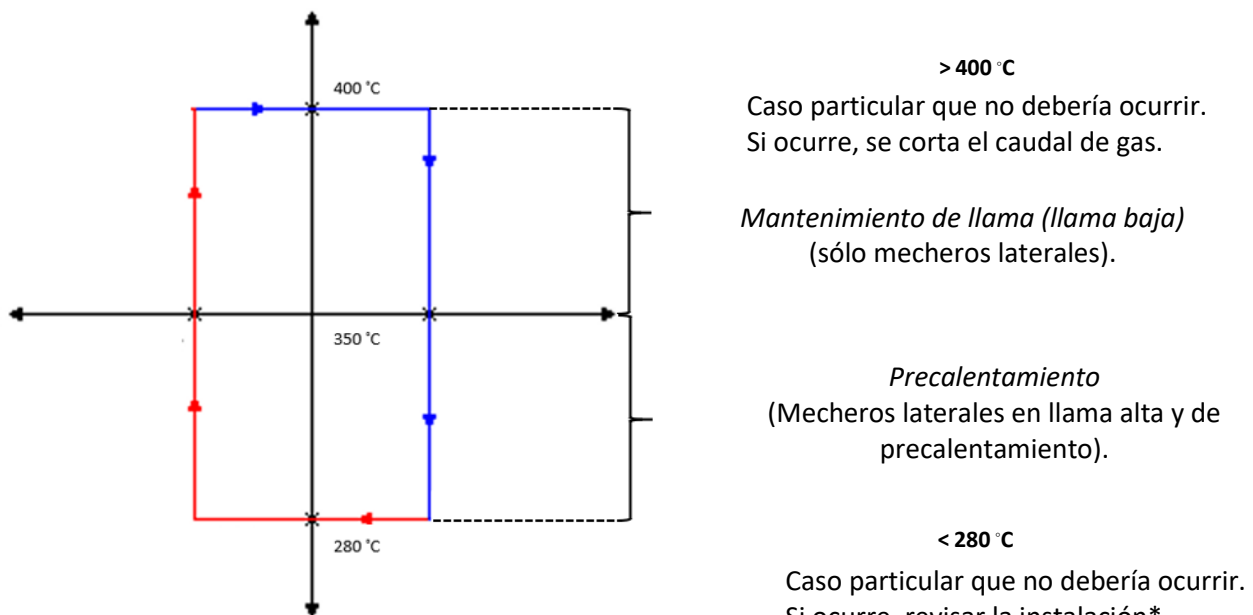


Figura 21. Esquema de ciclo de calentamiento del molde durante el ciclo de trabajo.
[Fuente]: realizado por el autor.

*Nota del autor: se trata de un caso particular porque durante el ciclo de trabajo no suele disminuir la temperatura por debajo de ese valor. A simple vista se podría decir que los quemadores están obstruidos impidiendo aportar calor al molde.

Finalmente, es importante añadir que nuestro molde no siempre llegará a la línea de producción con una temperatura de 280 °C fijados en nuestro ciclo de trabajo, sino que puede variar dependiendo del origen de donde proceda. Generalmente, dicho molde provendrá del proceso de poteyage (explicado en el apartado 1.1.2.6 y *anexo 3*), donde se pinta el molde entre 180 °C y 250°C. Es por ello que, antes de entrar en ciclo de trabajo se suele hacer un precalentamiento con una temperatura inicial que desconocemos, definiendo así un proceso previo de calentamiento antes de iniciar el propio ciclo de trabajo.

En conclusión, podemos resumir que tenemos tres etapas:

1. Precalentamiento antes del ciclo de trabajo de 25°C a 280°C (3 quemadores encendidos).
2. Precalentamiento durante el ciclo de trabajo de 280°C a 350°C. (3 quemadores encendidos).
3. Mantenimiento de la llama durante el ciclo de trabajo de 350°C a 400°C (2 quemadores encendidos).

2.3.2. PLANTEAMIENTO ANALÍTICO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO

Uno de nuestros principales objetivos se trata de conocer cuánta energía en forma de calor recibe el molde. Es por ello que, antes de hacer cualquier cálculo, se va a explicar las ecuaciones de transferencia de calor y números adimensionales que se van a utilizar a fin de modelizar el proceso de calentamiento y las posibles hipótesis que se plantean.

En primer lugar, se plantea un sistema principalmente dominado por dos mecanismos de transferencia de calor: convección y radiación.

$$q''_{TOTAL} = q''_{RADIACIÓN} + q''_{CONVECCIÓN} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

2.3.2.1. APROXIMACIÓN DEL INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN

Con respecto a la **radiación** ($q''_{RADIACIÓN}$), se plantea la siguiente ecuación⁶:

$$q''_{RADIACIÓN} = \frac{\epsilon_S + 1}{2} \cdot \sigma \cdot \epsilon_G \cdot (T_{LLAMA}^4 - T_S^4) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ (Constante de Stefan-Boltzmann).

ϵ_S : emisividad de la superficie del molde.

ϵ_G : emisividad de la llama $\approx 0,4 - 0,6$.

T_{LLAMA} : temperatura de llama [K].

T_S : temperatura de la superficie del molde [K].

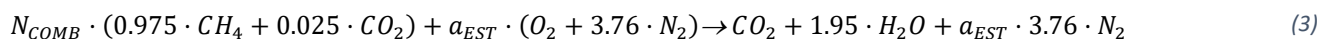
⁶ Z. H. Lin., capítulo 8, Thermohydraulic design of boiler components, en S. Kakac, Boilers, evaporators and condensers, John Wiley and Sons, (1991).

Para obtener los valores previamente propuestos, lo vamos a hacer por medio del software EES. Es por ello que, a continuación, se va a explicar que es cada variable y como se va a obtener.

1. **Emisividad del molde (ϵ_s)**, como no lo vamos a estimar como si se tratase de un cuerpo negro ($\epsilon = 1$), vamos a tener que estimar la emisividad de este. Para ello, se empleará la curva de calentamiento (obtenida de un calentamiento experimental situada en el *anexo 9*) que tenemos medida con un termopar de contacto junto con las termografías del molde y, a partir de esta medida, estimaremos el valor de la emisividad (resultados presentes en el *anexo 10*).
2. **Emisividad de la llama (ϵ_G)**, se ha establecido el rango de 0,4 a 0,6, siendo estos los valores más representativos con los que iteraremos los cálculos. En este caso no se ha visto necesario hacer un cálculo preciso, ya que lo que se busca es una aproximación. Si fuera necesario, utilizaríamos métodos para estimar la emisividad de llamas de gas en función de temperatura, concentración y longitud, presentes en la cita de la fuente previa ⁽⁶⁾.
3. **Temperatura de la superficie del molde (T_s)**, se va a tomar como constante con respecto del tiempo mediante un promedio aritmético, con datos presentes en el *anexo 9*. Además, junto con las termografías presentes en el *anexo 10*, se corregirá la emisividad del molde y se podrá observar claramente cuál es la distribución de temperatura en la superficie del molde, dato observable en el *anexo 11*.
4. **Temperatura de la llama (T_{LLAMA})**, para poder calcularla deberemos de estimar, en primer lugar, la *temperatura adiabática de llama* (temperatura teórica máxima que se puede alcanzar en la combustión completa), la cual obtendremos mediante una tabla termoquímica (presente en *anexo 13*) y restaremos determinados valores explicados a continuación, para finalmente, estimar la T_{LLAMA} . Para ello, se van a seguir los siguientes pasos basados en la fuente consultada⁷:

4.1. Plantear y ajustar la reacción de combustión de gas natural **estequiométrica** (la reacción no genera productos de O_2 , es decir, se consume todo el O_2) y **completa** (todo el C del combustible se convierte en CO_2). Además, hay que tener en cuenta que la composición del gas natural está formada principalmente por **CH_4** y **CO_2** (despreciamos otros compuestos como hidrocarburos, O_2 , H_2S ...), según se puede apreciar en la norma de calidad de gas de Enagas (operador del sistema de gas natural en España) insertada en el *anexo 6*.

- Suponemos el *aire seco* compuesto por 79 % de O_2 y 21 % de N_2 .
- Tomamos $N_{COMB} = 1$ como referencia ($Kmol$ de combustible).



De la cual resulta $a_{EST} = 1.95 \frac{Kmol_{AIRE}}{Kmol_{COMB}}$

⁷ C. Cortés, comunicación personal (2019).

- 4.2. Con los resultados de la ecuación previa (ecuación 3), se plantea una reacción de nuevo suponiendo una combustión **completa y no estequiométrica**, conocido como *combustión pobre*⁵ usando así la ecuación de *exceso de aire*, donde se supone que se supera el mínimo de aire teórico del estequiométrico, de lo cual surge la siguiente fórmula:

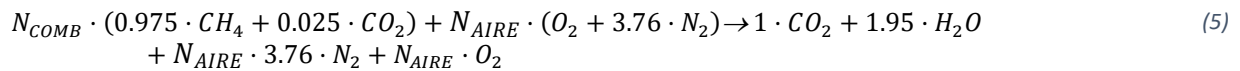
$$\% \text{ Exceso de aire} = \left(\frac{N_{AIRE}}{a_{EST}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (4)$$

De tal forma que, la relación aire/combustible queda definida como:

$$\phi = \frac{a_{EST}}{N_{AIRE}}, \text{ y para nuestro caso será } \phi < 1, \text{ ya que } N_{AIRE} < a_{EST}$$

Cabe destacar que en este caso de llamas de gas el exceso de aire se encuentra entre un mínimo del 2-5% y un máximo de 20-25%⁶.

Por tanto, se plantea la reacción de nuevo, se ajusta, dejándolo en función del *% Exceso de aire*:



- 4.3. Tras obtener la composición, se procederá a realizar el balance de energía, el cual se realizará aplicando la siguiente ecuación:

$$\sum n_{\text{productos}} \cdot \bar{h}_{\text{productos}} - \sum n_{\text{reactivos}} \cdot \bar{h}_{\text{reactivos}} = q - W \quad (6)$$

$$n: \text{ moles [Kmol]}. \quad \bar{h}: \text{ entalpía [} \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \text{]}$$

Además, se asume que:

- Estado *estacionario* ($\frac{dE}{dt} = 0$).
- $W = 0$, ya que no se introduce ni extrae trabajo.
- $T_{ENTRADA} = 25^\circ\text{C}$ (temperatura de entrada de los reactivos es la temperatura ambiente). Por ende, la entalpía de los reactivos queda $\bar{h}_{AIRE} = 0 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$ y $\bar{h}_{GAS NATURAL} = h_{CH_4}(25^\circ\text{C}) + h_{CO_2}(25^\circ\text{C})$.

Resulta:

$$1 \cdot \bar{h}_{CO_2}(T_{AD LLAMA}) + 1.95 \cdot \bar{h}_{H_2O}(T_{AD LLAMA}) + N_{AIRE} \cdot \bar{h}_{O_2}(T_{AD LLAMA}) + N_{AIRE} \cdot 3.76 \cdot \bar{h}_{N_2}(T_{AD LLAMA}) - 0.975 \cdot \bar{h}_{CH_4}(25^\circ\text{C}) - 0.025 \cdot \bar{h}_{CO_2}(25^\circ\text{C}) = 0 \quad (7)$$

- 4.4. Para obtener la temperatura adiabática de llama, haremos $Q = 0$, (ecuación 6) y se obtiene $\bar{h}_{CO_2}(T_{AD LLAMA})$ y $\bar{h}_{H_2O}(T_{AD LLAMA})$, de forma que el software EES obtendrá automáticamente. Para calcularla, tendríamos 2 ecuaciones (ecuación 4 y 5) con 2 incógnitas (N_{AIRE} y $T_{AD LLAMA}$).

- 4.5. Tras obtener $T_{AD LLAMA}$, se realizará una tabla termoquímica (*anexo 13*) en el software EES variando el *exceso de aire* (%), con el fin de obtener un valor más preciso. El motivo por el cual se aplica esta metodología se debe a que es innecesario aplicar metodologías más complejas, teniendo en cuenta que el objetivo final es obtener una aproximación de la energía transmitida.
- 4.6. Una vez obtenida, se calcula $T_{AD LLAMA}$ restando de forma aproximada a la temperatura obtenida previamente 300°C. El razonamiento de este cálculo se debe principalmente a:
- 4.6.1. En realidad, la llama abierta transfiere calor a la vez que quema el combustible, con lo cual la temperatura será menor con respecto de la llama adiabática.
- 4.6.2. A la salida existe una pequeña cantidad de monóxido de carbono (CO), debido al equilibrio de disociación del CO₂, lo cual tiene el efecto de disminuir la temperatura adiabática de llama.
- 4.6.3. El propio método⁶ indica que la temperatura que ha de tomarse para el cálculo debe ser menor que la obtenida.

Finalmente, con este valor calculado, procederemos a calcular $q''_{RADIACIÓN}$ de la *ecuación 2*.

2.3.2.2. APROXIMACIÓN DEL INTERCAMBIO DE CALOR POR CONVECCIÓN

Por otro lado, con respecto a la **convección** ($q''_{CONVECCIÓN}$), vamos a utilizar la ecuación abajo planteada con los datos que ya tenemos.

$$q''_{CONVECCIÓN} = h_{ESC} \cdot (T_{LLAMA} - T_S) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

Como bien se observa, el único dato carente es el coeficiente de convección h_{ESC} , el cual se va a estimar sabiendo que la situación en cuestión es un *chorro de gas perpendicular a la superficie*⁸, como se puede observar en la *figura 10* del *anexo 20*, procedente del puesto de producción. Además, se adjunta también un esquema donde se plantea un modelo representativo de convección, del cual se va a hacer uso para modelizar la transferencia de calor (*figura 11*).

Por lo tanto, para poder calcular dicho coeficiente, se procederá con la siguiente metodología a lo largo del *anexo 20*, donde se desarrolla ampliamente el planteamiento de todos los números adimensionales y parámetros necesarios para su cálculo.

Es importante destacar que tenemos 2 mecheros distintos que calientan el molde. Por un lado, los **mecheros de precalentamiento** (*figura 17*) y, por otro lado, los **mecheros laterales** (*figura 19 y 20*), de tal forma que, al tener ambos 2 diámetros de salida distintos, tendremos dos V_E distintas procedentes de la *ecuación 26 del anexo 20*, lo cual supone dos coeficientes de convección h_{ESC} distintos. Todo ello conlleva ampliar la *ecuación 8*, en dos términos distintos:

$$q''_{CONVECCIÓN} = q''_{CONV 1} + q''_{CONV 2} = h_{ESC 1} \cdot (T_{LLAMA} - T_S) + h_{ESC 2} \cdot (T_{LLAMA} - T_S) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (9)$$

⁸ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 7. External flow.

Una vez obtenidos dichos valores (véase *anexo 17*) sustituimos en la *ecuación 9*, y calculamos $q''_{CONVECCIÓN}$.

Finalmente, una vez tenemos calculados $q''_{CONVECCIÓN}$ y $q''_{RADIACIÓN}$, ambos componentes de la *ecuación 1*, obtenemos q''_{TOTAL} . Con ello, se volverá a calcular el coeficiente de convección global (h_{EQ}), el cual será el representativo en el periodo transitorio.

$$h_{EQ} = \frac{q''_{TOTAL}}{(T_{LLAMA} - T_{SUPERFICIE})} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (10)$$

2.3.2.3. ESTIMACIÓN COMO CAPACIDAD TÉRMICA AGRUPADA

Para poder analizar nuestro sistema como un *transitorio* de forma sencilla, tenemos primero demostrar que se puede modelizar como una **capacidad térmica agrupada**, de tal manera que la temperatura es aproximadamente uniforme a lo largo del transitorio y el tiempo de calentamiento no depende de la geometría, sino de la masa o volumen total. Para ello, vamos a utilizar de nuevo números adimensionales⁹ y ecuaciones de pared plana infinita¹⁷ explicados en el *anexo 20*.

Es por ello que, para considerar que nuestro sistema es una capacidad agrupada, nuestro criterio a utilizar será aproximadamente **Bi ≤ 0,1**⁹.

En el caso que sea afirmativo Bi ≤ 0,1⁹, entonces, se confirma de que se trata de un *sistema a capacidad térmica agrupada* y procederemos a utilizar las ecuaciones que se plantean en el capítulo citado para calcular el calor emitido durante el proceso de calentamiento⁹:

$$\theta(t) = \theta_i \cdot e^{\left(\frac{-h_{EQ} \cdot A_S \cdot t}{\rho \cdot V \cdot C}\right)} \text{ con } \theta = T - T_F \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11)$$

Donde:

ρ : densidad del molde $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$.

V : volumen del molde $[m^3]$.

A_S : área de contacto entre llama y molde $[m^2]$.

C : capacidad calorífica $\left[\frac{KJ}{Kg \cdot K}\right]$.

De la ecuación previa, obtendremos $T_S(t)$ exponencial, es decir, la temperatura de la superficie del molde con respecto del molde, ya que:

$$\theta(t) = T_S(t) - T_F \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \theta_i = T_I - T_F \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12)$$

Donde:

T_I : temperatura ambiente ≈ 25 °C.

T_F : temperatura final del molde (*anexo 11*).

Una vez obtenido h_{EQ} y $T_S(t)$, podemos calcular el calor q_{TOTAL} absorbido por el molde (J) utilizando la ecuación siguiente, donde se utiliza $T_S(t)$ como variable de integración e integramos para todos los instantes de tiempo:

$$\dot{q}[W] = \frac{dq}{dt} \left[\frac{J}{s} \right]; dq = \dot{q} \cdot dt \quad (12)$$

$$q_{TOTAL} = \int_0^t h_{EQ} \cdot A_S \cdot (T_{LLAMA} - T_S(t)) \cdot dt = h_{EQ} \cdot A_S \cdot T_{LLAMA} \cdot \int_0^t \left(1 - \frac{T_S(t)}{T_{LLAMA}}\right) \cdot dt [J] \quad (13)$$

Donde:

t : tiempo de calentamiento $[s]$ (ver *anexo 11*).

A_S : área de contacto entre llama y molde $[m^2]$ (ver *anexo 8*).

⁹ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 5. Transient conduction.

Si, por el contrario, se obtiene $Bi > 0,1$ ⁹, entonces los gradientes de temperatura dentro del sólido empiezan a ser significantes. Por tanto, la temperatura en la sección del sólido es diferente con respecto la temperatura de la pared del sólido y el fluido en contacto¹⁸, como se puede apreciar en la *figura 22*.

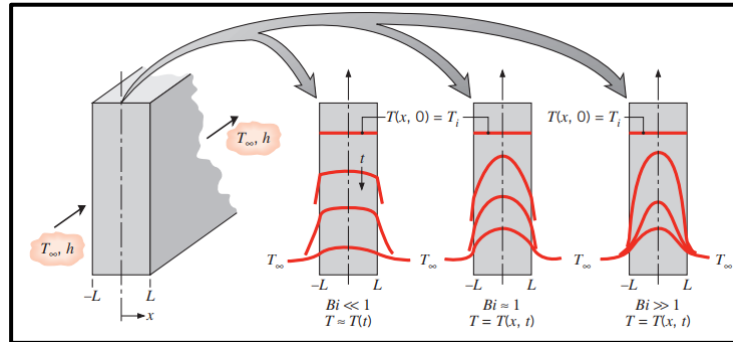


Figura 22. Distribución de temperatura para diferentes números de Biot.
 [Fuente]: Incropera & DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Wiley (1989). Figura 5.4 página 584.

Por lo tanto, la ecuación que nos ofrece la aproximación más precisa para para el caso en que $Bi \gg 0,1$ y $Fo > 0,2$ ¹⁰:

$$\frac{q}{q_0} = 1 - \frac{\text{sen}\xi_1}{\xi_1} \cdot \theta_0^x \text{ con } \theta_0^* = \frac{T_{LL} - T_S}{T_{LL} - T_I} \quad (14)$$

$$q_0 = m \cdot C \cdot (T_{LL} - T_I) \quad (15)$$

Donde:

q : calor total que se ha sido introducido durante el transitorio en un tiempo “ t ” [KJ].

q_0 : calor máximo transferido si el proceso continuara con $t = \infty$ [KJ].

ξ_1 : coeficientes dependientes del Biot (*anexo 12*).

T_I : temperatura ambiente $\approx 298,15$ K.

Con este resultado podremos obtener una idea aproximada de cuánto calor se ha transmitido al centro del molde, y estimar la distribución de temperatura.

¹⁰ Incropera & DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, Wiley (1989). Capítulo 5, página 302, ecuación 5.49.

2.2.3. EL PROBLEMA DE LA EFICIENCIA EN LOS QUEMADORES

En primer lugar, estos quemadores son problemáticos a nivel energético, debido a que se observa claramente que hay una gran cantidad del calor emitido desde el quemador que no llega al molde por razones de puro contacto. Es decir, la llama del mechero no está en contacto 100% con el molde. Además, la ausencia de aislamiento en los alrededores entre molde y quemador permite que haya calor que escape, aumentando así las pérdidas entre ambos dos.

Por otro lado, también cabe destacar que, como resultado del uso constante de los mecheros durante la producción y la ausencia de mantenimiento preventivo, resulta en que muchos de estos quemadores se encuentran llenos de óxido y con fugas. Esto conlleva a pérdidas tanto de calor por zonas oxidadas, como pérdidas de propio combustible por los agujeros de este. En la *figura 10 del anexo 20* se puede apreciar con claridad.

Asimismo, es imperativo destacar los problemas a nivel ergonómico que genera su manipulación por parte de los operarios. Al ser los mecheros de precalentamiento un elemento encargado de llevar al molde a una temperatura de 350 °C, supone que este utillaje se caliente y escapen llamas por zonas donde no debería, suponiendo un obvio problema de seguridad.

En conclusión, se plantea a priori que **cualitativamente** se tiene una **eficiencia baja** y un **gran problema de seguridad** a la hora de su manipulación. La siguiente ecuación estima aproximadamente la eficiencia del quemador:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{q_o}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot PCI \cdot t} \quad (16)$$

Donde:

PCI : Poder Calorífico Inferior $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$.

q_o : calor máximo transferido si el proceso durara $t=\infty$.⁹

Para obtener directamente el caudal másico:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_Q \cdot V_E \quad (17)$$

Donde

A_Q : área de salida del quemador.

\dot{m}_1 : caudal másico de mecheros de precalentamiento $\left[\frac{Kg}{s}\right]$.

\dot{m}_2 : caudal másico de mecheros laterales $\left[\frac{Kg}{s}\right]$.

3. ANÁLISIS DEL PROCESO

A lo largo de este capítulo se van a desarrollar las ecuaciones propuestas en el apartado 2.2.3. de tal forma que todos los datos (propiedades térmicas o geométricas) que no se han incluido o calculado en apartados anteriores, se mostrarán en este. A excepción de aquellas propiedades (del fluido principalmente) que no posean referencia, ya que han sido obtenidas con el software EES directamente.

3.1. RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DE RADIACIÓN

Debido a que de la *ecuación 1* los únicos valores que faltan por calcular son T_S y T_{LL} , se presentan a continuación:

$$T_S = 315 \text{ °C (anexo 11)}.$$

Tras resolver la *ecuación 7* acorde a los razonamientos desarrollados a lo largo del apartado 2.3.2.1, se va a resolver la *ecuación 2* en base a los valores más representativos del *anexo 13*. Cabe destacar que, debido a que no conocemos los valores de ϵ_G y *exceso de aire*, se han ido variando acorde a lo citado en apartados anteriores.

Es por ello que, a continuación, se presenta la siguiente tabla para los diferentes valores de *exceso de aire*, $T_{AD LLAMA}$ y T_{LLAMA} y los resultados de calor transferido por radiación.

$$q''_{RADIACIÓN} = \frac{0,817 + 1}{2} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_G \cdot (T_{LLAMA}^4 - 588,15^4) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

<i>Exceso de aire</i> [%]	$T_{AD LLAMA}$ [K]	T_{LLAMA} [K]	ϵ_G	$q''_{RADIACIÓN}$ [$\frac{W}{m^2}$]
5,02	1990	1690	0,4	165614,094
			0,5	207017,617
			0,6	248421,141
10,04	1941	1641	0,4	146952,344
			0,5	183690,431
			0,6	220428,517
15,06	1894	1594	0,4	130555,858
			0,5	163194,823
			0,6	195833,788
20,08	1852	1551	0,4	116772,661
			0,5	145965,826
			0,6	175158,991

Tabla 1. Valores de calor transmitido por radiación variando emisividad y temperatura de llama.
[Fuente]: realizada por el autor (07/09/2019).

En la tabla adjunta se puede observar los valores **máximo** $q'' = 248.421,141 \frac{W}{m^2}$, **intermedio** (valor más cercano al promedio) $q'' = 175.158,991 \frac{W}{m^2}$ y **mínimo** $q'' = 116.772,661 \frac{W}{m^2}$.

3.2. RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DE CONVECCIÓN

Como bien se puede observar en el *anexo 17*, se presentan los cálculos de los coeficientes de convección $h_{ESC 1}$ y $h_{ESC 2}$ de tal manera que ya se puede obtener el calor total intercambiado por convección de la *ecuación 9*, pero, como sabemos que la T_{LLAMA} no es un valor fijo (ya que desconocemos el *exceso de aire*) y T_5 es una variable ya establecida previamente (*anexos 10 y 11*). Entonces, se va a realizar una tabla para observar los valores máximos y mínimos obtenidos de la *ecuación 9*.

$$q''_{CONV 1} = 15,7 \cdot (T_{LLAMA} - (315 + 273,15))$$

$$q''_{CONV 2} = 9,54 \cdot (T_{LLAMA} - (315 + 273,15))$$

Dichos resultados se presentan en la siguiente tabla:

T_{LLAMA} [K]	q''_{CONV1} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	q''_{CONV2} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	$q''_{CONV TOTAL}$ $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
1690	17299,045	10511,649	27810,694
1690			
1690			
1641	16529,745	10044,189	26573,934
1641			
1641			
1594	15791,845	9595,809	25387,654
1594			
1594			
1551	15116,745	9185,589	24302,334
1551			
1551			

Tabla 2. Calor transferido por convección variando la temperatura de llama.
[Fuente]: realizada por el autor (07/09/2019).

En la tabla adjunta se puede observar los valores **máximo** $q'' = 27.810,7 \frac{W}{m^2}$, y **mínimo** $q'' = 24.302,334 \frac{W}{m^2}$.

3.3. OBTENCIÓN DE CALOR TOTAL INTERCAMBIADO Y COEFICIENTE DE CONVECCIÓN

Finalmente, una vez hemos obtenido valores de radiación y convección y, según se presenta al final del apartado 2.2.3.2 del capítulo anterior, se procede a aplicar la *ecuación 10* para calcular los valores de h_{EQ} en base al calor total intercambiado, destacando así valores mínimo, medio y máximo.

EXCESO AIRE [%]	ε_G	T_{LLAMA} [K]	q''_{RAD} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	q''_{CONV1} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	q''_{CONV2} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	$q''_{CONV TOTAL}$ $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	q''_{TOTAL} $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	q''_{TOTAL} [%]		h_{EQ} $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
								q''_{CONV}	q''_{RAD}	
5,02	0,4	1690	165614,094	17299,05	10511,65	27810,69	193424,79	14,38%	85,62%	175,55
	0,5	1690	207017,617				234828,31	11,84%	88,16%	213,12
	0,6	1690	248421,141				276231,83	10,07%	89,93%	250,70
10,04	0,4	1641	146952,344	16529,75	10044,19	26573,93	173526,28	15,31%	84,69%	164,82
	0,5	1641	183690,431				210264,36	12,64%	87,36%	199,71
	0,6	1641	220428,517				247002,45	10,76%	89,24%	234,60
15,06	0,4	1594	130555,858	15791,85	9595,81	25387,65	155943,51	16,28%	83,72%	155,04
	0,5	1594	163194,823				188582,48	13,46%	86,54%	187,49
	0,6	1594	195833,788				221221,44	11,48%	88,52%	219,93
20,08	0,4	1551	116772,661	15116,75	9185,59	24302,33	141074,99	17,23%	82,77%	146,52
	0,5	1551	145965,826				170268,16	14,27%	85,73%	176,84
	0,6	1551	175158,991				199461,32	12,18%	87,82%	207,16

Tabla 3. Calor transferido total variando exceso de aire y emisividad de la llama.
[Fuente: realizada por el autor (07/09/2019)]

Por lo tanto, como puede observarse en la tabla adjunta los valores **máximos** son $q''_{TOTAL} = 276.231,67 \frac{W}{m^2}$ y $h_{EQ} = 250,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, **intermedios** (más cercano al promedio) de $q''_{TOTAL} = 194.424,79 \frac{W}{m^2}$ y $h_{EQ} = 175,55 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, y **mínimos** $q''_{TOTAL} = 141.074,99 \frac{W}{m^2}$ y $h_{EQ} = 146,52 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

A continuación, se presenta gráficamente los datos de la tabla previa:

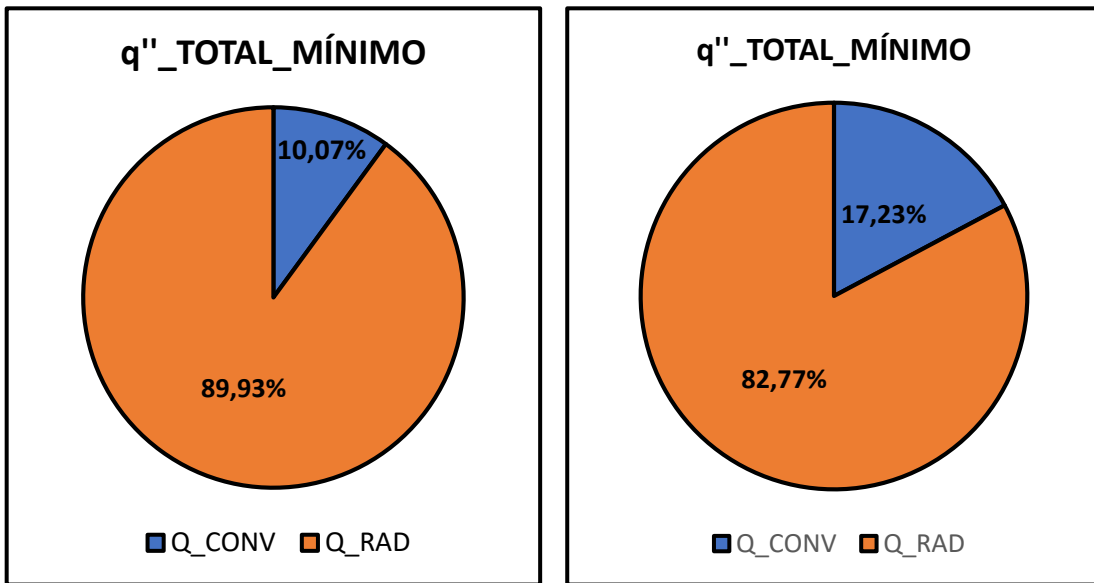


Gráfico 1 y 2. Distribución de valores máximos y mínimos del calor total entre radiación y convección.
[Fuente]: realizada por el autor (07/09/2019)

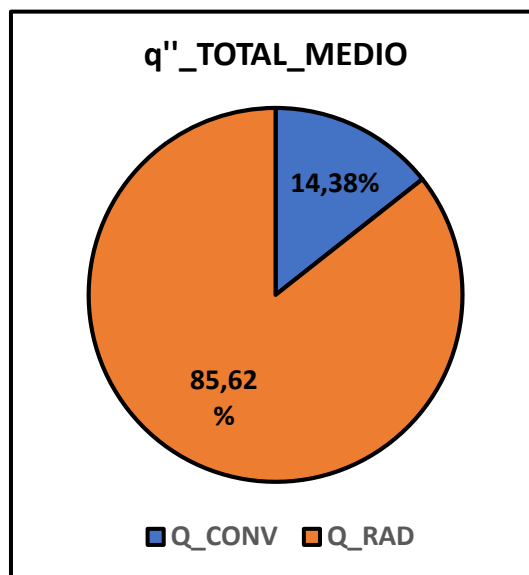


Gráfico 3. Distribución de valores intermedios del calor total entre radiación y convección.
[Fuente]: realizada por el autor (07/09/2019)

Observando estos gráficos queda demostrado que el calor transferido por radiación es superior al transferido por convección, siendo la **radiación** el medio de transferencia de calor **dominante** entre un **83% a 90%**, quedando así entre un **10% a 17%** el restante por convección.

3.4. RESULTADOS DE CALOR INTERCAMBIADO

A la vista de los resultados presentados en el *anexo 18*, queda claro que, como nuestro $Bi > 0,1$ y $Fo > 0,2$, la distribución de temperatura será acorde a la *figura 22*. Por lo tanto, pasaremos a resolver la *ecuación 14* y se descarta la opción del **sistema a capacidad térmica agrupada**.

Sustituyendo valores en las *ecuaciones 12 y 15* :

$$q_o = m \cdot C \cdot (T_{LL} - T_I) = 750 \cdot 0,515 \cdot (350 - 25) = 112.012,5 \text{ KJ}$$

$$\dot{q}_o = \frac{q_o}{t} = \frac{112.012,5}{4052} = 27,65 \text{ KW}$$

Utilizando los valores del *anexo 18* y *anexo 12*, nos queda:

- q para $Bi_{MÁX}$:

$$\zeta_{1 \text{ MAX}}(Bi = 3) = 1,192$$

$$q_{MÁX} = q_o \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} \xi_1}{\xi_1} \cdot \theta_o^x\right) = 112.012,5 \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} 1,192}{1,192} \cdot \frac{1690 - 588,15}{1690 - 298,15}\right) = 42.895,065 \text{ KJ}$$

- q para Bi_{MED} :

$$\zeta_{1 \text{ MED}}(Bi = 2) = 1,0769$$

$$q_{MED} = q_o \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} \xi_1}{\xi_1} \cdot \theta_o^x\right) = 112.012,5 \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} 1,0769}{1,0769} \cdot \frac{1690 - 588,15}{1690 - 298,15}\right) = 39.511,03 \text{ KJ}$$

- q para $Bi_{MÍN}$:

Interpolando para $Bi=1,7$:

$$\zeta_{1 \text{ MIN}}(Bi = 1,7) = 1,012$$

$$q_{MÍN} = q_o \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} \xi_1}{\xi_1} \cdot \theta_o^x\right) = 112.012,5 \cdot \left(1 - \frac{\text{sen} 1,012}{1,012} \cdot \frac{1690 - 588,15}{1690 - 298,15}\right) = 37.717,85 \text{ KJ}$$

Finalmente, como ya tenemos todos los valores obtenidos en el *anexo* calculamos todos los valores necesarios para calcular el rendimiento , sustituimos en la *ecuación 16*:

$$\eta = \frac{q_o}{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) \cdot PCI \cdot t} = \frac{112.012,5}{(3,13 + 3,15) \cdot 10^{-3} \cdot 52.185,8 \cdot 4052} = 0,0843 = \mathbf{8,34\%}$$

3.5. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS

3.5.1. ALTERNATIVA 1: CALENTAMIENTO INDUCTIVO

El calentamiento inductivo es una metodología muy utilizada en métodos y procesos de fabricación en los que se requiere una gran cantidad de calor como *soldadura* (brazing y soldering), *tratamientos térmicos* (endurecimiento y temple) o *calentamientos de grandes masas de material*¹¹ (forja o fundiciones) gracias a la gran intensidad de calor que aporta en poco tiempo. Un ejemplo donde se observa este procedimiento son los hornos de inducción.

Este proceso consiste entonces en la variación de voltaje (V) en una bobina inductora el cual generará una corriente inducida (I) dentro del circuito magnético, de tal manera que el calor aportado viene definido por el *efecto Joule* ($I^2 \cdot R$). Es por ello que los principales parámetros para tener en cuenta con respecto a los materiales son²²:

- Resistividad eléctrica (conductividad eléctrica) $\rho(T)$ [$\mu\Omega \cdot m$]: facilidad/dificultad para conducir la electricidad la cual aumenta con la temperatura en la mayoría de los materiales.
- Permeabilidad magnética μ [$\frac{H}{m}$] y permeabilidad magnética relativa μ_r : propiedad de un material para “conducir” flujo magnético a través de su interior. Además, se utiliza la $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, siendo μ_0 la permeabilidad en el vacío y poder así comparar unos materiales y otros. Con respecto a esta propiedad es imperativo tener en cuenta la *temperatura de Curie* (temperatura a la cual el material pierde sus propiedades magnéticas,) para el molde escogido. Es por ello que nuestro molde deberá tener un alto valor de este parámetro.

Según el catálogo de ELDEC¹² (proveedor alemán de equipos de calentamiento inductivo) ofrece máquinas con **rendimientos mayores de 90%** con un rango muy amplio de potencias, desde 5 a 3000 KW. En nuestro caso, a la hora de escoger un equipo en base al calor aportado, con un equipo de entre 20 a 30 KW es suficiente.

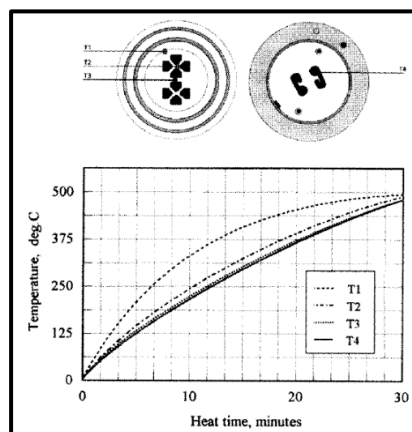


Figura 23. Perfil típico temperatura- tiempo para dados de extrusión de aluminio.

[Fuente:] V.Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M.Black, Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing), CRC Press. Figura 6.29.

¹¹ V.Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M.Black, Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing), CRC Press. Capítulo 1.

¹²https://cdn.eldec.net/fileadmin/user_upload/user_upload/Dateien/produkt_prospekte/eldec_generator/eldec_generators_spanish_2017.pdf

Finalmente, como se puede observar en la *figura 23*, la curva T1 ofrece una estimación del tiempo para calentamiento de dados de extrusión (proceso semejante a este caso) de aluminio, de tal forma que nos ofrece una temperatura de 350 °C en aproximadamente 15 min a 20 min en el centro del dado.

3.5.2. ALTERNATIVA 2: QUEMADORES POROSOS

Esta metodología consiste en la combustión de gases (propano, metano o gas natural) caracterizada por la ausencia de llama de tal forma que la transmisión de calor se realiza mediante radiación y conducción usando como medio un espumas cerámicas como Alúmina (Al_2O_3), óxido de Circonio (ZrO_2) o Carburo de Silicio (SiC), notable reducción de emisiones contaminantes de NO_x y eficiencia de hasta 47%²⁴ con una alta densidad de calor. Generalmente, estos equipos están divididos en tres zonas¹³:

- Zona A (“Region A”, *figura 24*): región donde se realiza la mezcla de aire y combustible.
- Zona C (“Region C”, *figura 24*): región donde ocurre la combustión del aire y combustible.
- Zona D (“Region D”, *figura 24*): región de transmisión de calor al exterior.

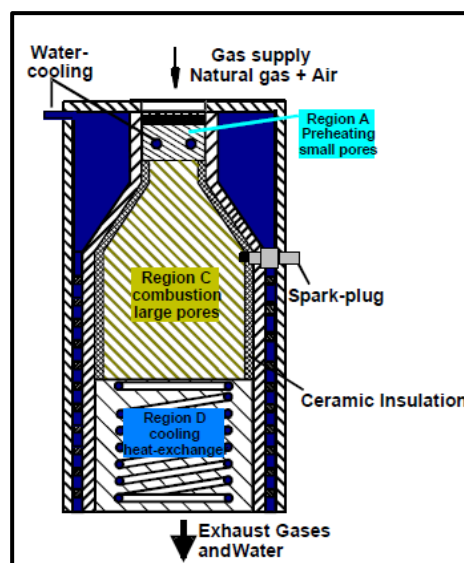


Figura 15. Regiones de un quemador poroso.

[Fuente]: F. Durst, D. Trimis, K. Pickenäcker, *Compact Porous Medium Burner and Heat Exchanger for Household Applications*, Universität Erlangen-Nürnberg. *Figura 1.*

Cabe destacar que de los parámetros más importantes de este proceso con respecto a los materiales caben destacar:

- *Conductividad térmica de la espuma de cerámica* ($\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$): es primordial que todo el calor generado en la región de combustión sea transmitido al exterior, de tal forma que de las espumas de cerámica elegidas poseen baja a excepción del Carburo de Silicio.

¹³ F. Durst, D. Trimis, K. Pickenäcker, *Compact Porous Medium Burner and Heat Exchanger for Household Applications*, Universität Erlangen-Nürnberg.

- *Porosidad de la espuma de cerámica:* en este caso las fibras cerámicas ofrecen mejor porosidad, en cambio, peor conductividad. Es por ello que, para cada zona del quemador, hay que elegir un material adecuado y no puede establecer uno estándar.

Finalmente, según el catálogo PROMEOS¹⁴ (proveedor alemán de tecnologías de quemadores porosos), ofrece soluciones para el calentamiento específicamente para fundiciones de tal manera que los sistemas que aporta son flexibles, es decir, pueden aplicarse a diferentes medios (moldes, hornos...). Más concretamente, este fabricante promete **tiempos de calentamiento inferiores** y una **eficiencia (≈50%)** superior que con los quemadores premezcla, que, como bien se describe en apartados anteriores, es la solución más común y barata que suele utilizarse en este tipo de industria.

Faster heating than conventional flame burner

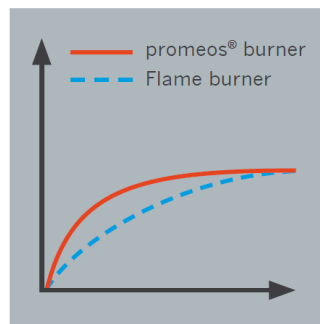


Figura 16. Reducción de tiempo de calentamiento.

[Fuente]: http://www.promeos.com/cms/upload/download/promeos_11_beheizungsloesungenpfannen_web_en.pdf

¹⁴http://www.promeos.com/cms/upload/pdf/Prospekte/promeos_beheizungsloesungen_Werkzeuge_e_web.pdf

3.5.3. ALTERNATIVA 3: CALENTAMIENTO RESISTIVO

El calentamiento resistivo es un método sencillo que consiste en generar una diferencia de voltaje (V) por una resistencia eléctrica (R) diseñada con una geometría específica de tal manera que por *efecto Joule* se genere calor y este calor sea transmitido mediante conducción y radiación hacia el molde. Además, en semejanza con el método descrito en el *apartado 4.1*, algunos de los parámetros destacables de este proceso con respecto de los materiales son:

- *Resistividad eléctrica (conductividad eléctrica) ($\rho(T)$ [$\mu\Omega \cdot m$])*: tanto el molde como el equipo empleado para el calentamiento deben ofrecer bajas resistividades, a que al tener temperaturas altas es importante que este valor no aumente en exceso y se pueda obtener un tiempo menor de calentamiento con respecto al actual.
- *Conductividad térmica del resistor (λ [$\frac{W}{m \cdot K}$])*: de igual manera que la propiedad anterior, el resistor (parte del equipo encargada de aumentar su temperatura y, en contacto con el molde, transmitir el calor necesario) debe tener un valor alto de esta propiedad.
- *Geometría del resistor*: la forma del utillaje empleado para calentar el molde es imprescindible que corresponda adecuadamente con las zonas del molde con mayor demanda de temperatura y así permitir generar una distribución de temperatura adecuada y acorde a la pieza a fabricar.

Finalmente, según el catálogo Electrifer SA¹⁵ (proveedor catalán de diseño y fabricación de sistemas para calentamiento en procesos industriales) ofrece una múltiple variedad de resistores de diferentes geometrías para diferentes aplicaciones desde **1 a 50 KW**. A pesar de ser un método de calentamiento, no especifica el empleo en fundiciones. Sin embargo, cabe la posibilidad de mecanizar huecos en el molde para introducir los resistores de tal forma que el proceso de calentamiento tenga la máxima eficiencia (en el catálogo no aportan ningún dato de tiempos de calentamiento o eficiencias del proceso), a pesar de que la referencia¹⁶ informa que posee eficiencias semejantes al proceso de inducción descrito anteriormente.

¹⁵<https://www.electricfor.com/en/50913/Downloads/Catalogue.htm>

¹⁶ J. Davies, Conduction and induction heating, P. Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers (1990), series 11. Capítulo 1. Fundamentals.

4. CONCLUSIONES

4.1. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

1. Como bien se puede observar en los *gráficos 1, 2 y 3* se puede concluir que el calor necesario para el calentamiento del molde de 25°C a 350°C es aproximadamente de **27,67 KW**. Además, la radiación domina el proceso de transferencia de calor en un **85%** con rangos de calor entre 120 KW a 250 KW (calculados en la *tabla 1*) frente a la convección con un **15%** con valores de entre 24 KW a 28 KW (calculados en la *tabla 2*). Este valor tan bajo de convección se debe principalmente a:
 - 1.1. $Q_1 = 0,006766 \frac{m^3}{s}$ (caudal que circula por la tubería de distribución de gas natural en el puesto 1), el cual nos aporta los valores de velocidad V_{E1} y V_{E2} en sendos mecheros. Asimismo, estas velocidades afectan al *número de Reynolds*, que, a su vez, afecta al *número de Nusselt* y nos llevará finalmente a los coeficientes de convección h_{E1} y h_{E2} , los cuales, finalmente nos definirán el coeficiente de convección equivalente h_{EQ} , con el cual estimaremos el Biot y, por tanto, la aproximación de la cantidad de calor transferido.
 - 1.2. Otro factor que ha llevado a estos valores de radiación y convección ha sido la variable $T_{AD LLAMA}$, que hemos tenido que estimar debido a la ausencia del dato de *exceso de aire* en los gases de escape de la reacción de combustión presentada en la *ecuación 5*, lo cual nos ha llevado a obtener resultados menos precisos de lo esperado.
 - 1.3. A pesar de lo comentado en los dos apartados anteriores, cabe destacar que en el caso de haber tenido los medios in-situ para poder medir dichos datos, no hubiera sido posible la medición de los mismos, ya que, como se comenta a lo largo del *capítulo 2*, la prioridad principal es la producción, de tal manera que, a pesar de poder aportar un beneficio significativo a la producción, no sería posible parar la misma para poder realizar la toma de datos necesaria.
2. Con respecto al transitorio establecido para tiempos largos, donde, como se esperaba, obtenemos valores de $Bi \gg 0,1$ y $Fo > 0,2$, de tal manera que los valores obtenidos con respecto al número de **Biot** son entre **1 y 3**, y un valor del número de **Fourier** de 121,56, ratificando así que la *ecuación 14* se encuentra dentro de los valores de los números adimensionales previos.
3. Finalmente, como bien nos esperábamos y así se explica en el *apartado 2.2.4*, no nos sorprende obtener un rendimiento térmico de **8,4%**, debido a las numerosas fugas, falta de aislamiento térmico, ausencia de mantenimiento y exceso e indebido uso que presentan estos utillajes.

4.2. CONCLUSIONES DE CADA ALTERNATIVA

Con relación a las alternativas, la interacción con los proveedores, por lo general ha sido un fracaso, debido a que, tras numerosos intentos fallidos de contactar con personas vinculadas con esa compañía (mail o teléfono) ninguna de las empresas citadas ha tenido interés en aportar información sobre parámetros con relación a su metodología, principalmente por la ausencia de presupuesto.

Por otro lado, a continuación, se plantea las siguientes gráficas con los principales parámetros aproximados, ya que ningún proveedor aporta este tipo de información. A pesar de ello, se pretende ofrecer una visión comparativa de las alternativas con respecto a la actual.

1. EFICIENCIA ENERGÉTICA:

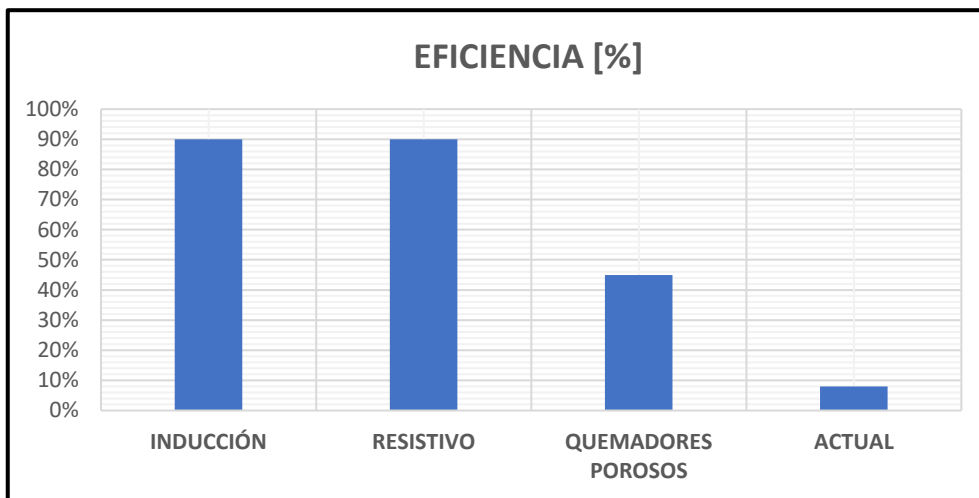


Gráfico 3. Eficiencias de cada alternativa.
[Fuente]: realizado por el autor (16/09/2019).

Como bien se puede observar en este gráfico, queda claro que el método actual es muy poco eficiente con respecto a los otros. Además, tanto el método de inducción como el resistivo poseen alta eficiencia con respecto al resto. Finalmente, el método de quemadores porosos ofrece una eficiencia media.

2. TIEMPO DE CALENTAMIENTO:

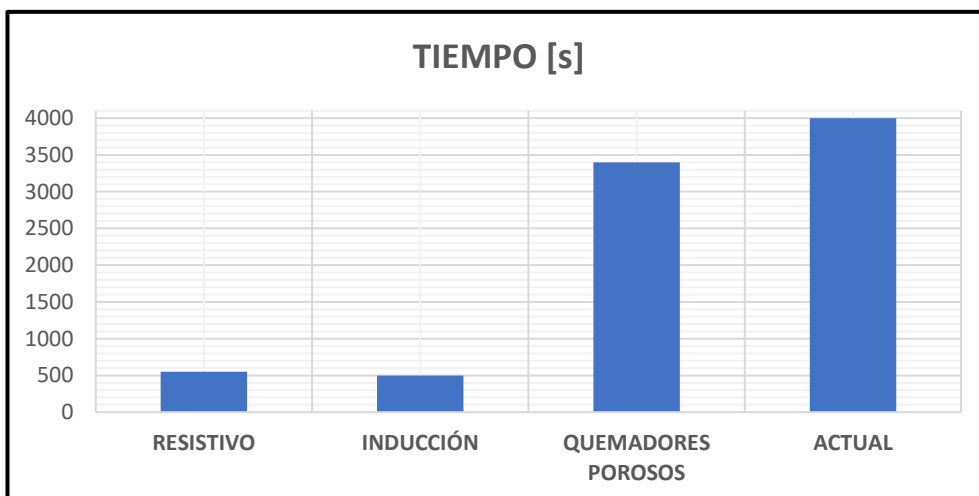


Gráfico 4. Tiempo de calentamiento del molde.
[Fuente]: realizado por el autor (16/09/2019).

Esta variable es de alta importancia, ya que nos afectará a la hora de fabricar las piezas a fundir. Por lo tanto, lo que se busca es reducir este tiempo lo máximo posible con una eficiencia y coste mínimo posible. Es por ello que, con respecto a esta variable, los métodos seleccionados serían la **inducción y resistivo**, debido a la rapidez a la hora de establecer la temperatura de trabajo.

3. COSTE APROXIMADO:

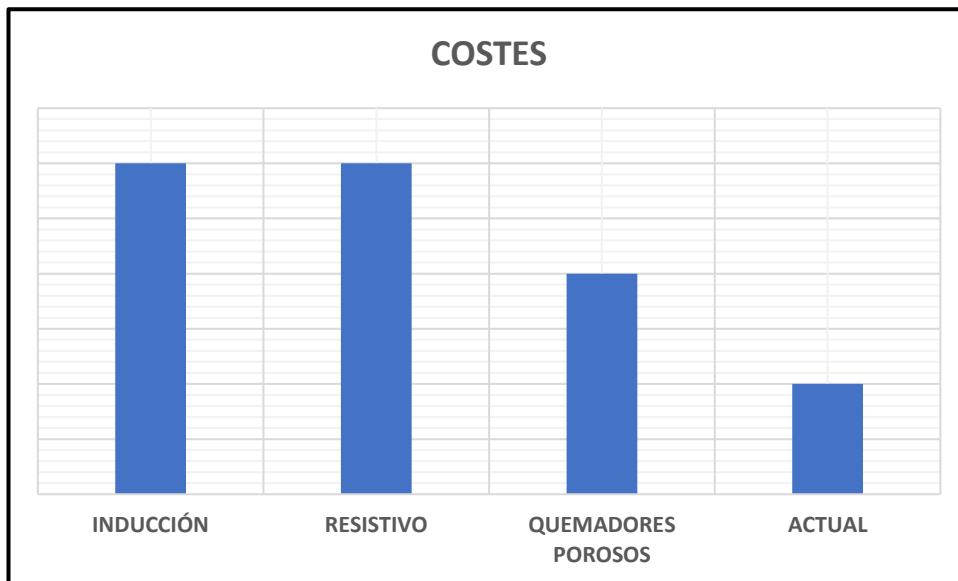


Gráfico 5. Coste de cada alternativa.
[Fuente]: realizado por el autor (16/09/2019).

Finalmente, ésta es la variable determinante para la selección del método definitivo, ya que la realización de la inversión es el momento en el cual los responsables de producción deciden si vale la pena o no el empleo de esta metodología en cuestión. Por lo tanto, cabe destacar que los métodos más caros serán la inducción y resistivo, por numerosos motivos como: creación de nuevas instalaciones a instalar en el puesto, desconocimiento y falta de experiencia en el campo de ambas metodologías (mantenimiento, producción...), costes logísticos e instalación de máquinas, coste de electricidad frente a coste de gas natural... y una larga lista de motivos que llevarían a destacar estas dos opciones.

Sin embargo, la opción del quemador poroso, al seguir utilizando gas natural y teniendo cierta semejanza con respecto de los procesos de calentamiento actuales de combustión de gas natural, supondría un gran ahorro en experiencia y formación de personal por parte de la empresa. A pesar de ello, hay que tener en cuenta los gastos que supondría la logística, instalación y mantenimiento de estos equipos.

4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ALTERNATIVA

CALENTAMIENTO INDUCTIVO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta eficiencia.	Sustitución de utillaje por otro con mejores propiedades magnéticas.
Menores tiempos de calentamiento.	Alto coste (coste de instalación, logística, coste de KW eléctrico...).
Ahorro en seguridad (eliminar el riesgo de empleo gas natural y todo el gasto en ropa, utillajes, equipamiento contra incendios...).	Creación de nuevos riesgos todavía por descubrir al emplear este método.
Reducción de contaminación en el puesto y medio ambiente.	Falta de experiencia en este ámbito (formación y contratación de expertos en el ámbito de la fabricación con esta metodología).

*Tabla 4. Ventajas y desventajas del calentamiento inductivo.
[Fuente]: realizada por el autor (16/09/2019).*

QUEMADORES POROSOS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Eficiencia media.	Coste medio (instalación, logística...).
Menores tiempos de calentamiento.	Falta de experiencia e información con respecto a este ámbito (mantenimiento y producción con esta metodología).
Reducción de contaminación en el puesto y medio ambiente.	Dispositivo frágil con mucha facilidad para romperse en caso de golpes y dejar de funcionar correctamente
Reducción de accidentes en el puesto por los problemas generados con los quemadores de gas natural.	Dispositivos complicados de industrializar en un puesto de producción continua.

*Tabla 5. Ventajas y desventajas de los quemadores porosos.
[Fuente]: realizada por el autor (16/09/2019).*

CALENTAMIENTO RESISTIVO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alto rendimiento.	Alto coste (coste de instalación, logística, coste de KW eléctrico...).
Menores tiempos de calentamiento.	Modificación de los utillajes de fundición para obtener la máxima eficiencia posible.
Ahorro en seguridad (eliminar el riesgo de empleo gas natural y todo el gasto en ropa, utillajes, equipamiento contra incendios...).	Creación de nuevos riesgos todavía por descubrir al emplear este método.
Reducción de contaminación en el puesto y medio ambiente.	Falta de experiencia en este ámbito (formación y contratación de expertos en el ámbito de la fabricación con esta metodología).

*Tabla 6. Ventajas y desventajas del calentamiento resistivo.
[Fuente]: realizada por el autor (16/09/2019).*

Tras observar las gráficas y acorde a las ventajas y desventajas presentadas, concluimos que el método más adecuado son los **quemadores porosos**, gracias principalmente a la facilidad que aporta a la hora de poner a punto este nuevo sistema con respecto del actual y la eficiencia que ofrece con respecto de la situación actual.

En conclusión, es importante comentar un problema que ha surgido a la hora de hacer este proyecto que radica en la falta de información técnica que existe con respecto al tema de la fundición. Si bien es cierto que para obtener una estimación teórica de lo que se trata, se puede encontrar bastante material dentro de la mayor parte de fuentes bibliográficas. Sin embargo, con respecto a una aplicación práctica es complicado encontrar datos aceptables. Para solucionarlo, lo mejor opción ha sido investigar y buscar dentro de documentos propios de esta empresa y la resolución de dudas por parte de los profesionales que se dedican en este sector.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- ¹ <https://www.daimler.com/innovation/diesel/om656-2.html>
- ² Allan Kayne & Arthur Street, Die casting metallurgy, 1st edition (1982). Capítulo 4.
- ⁴ <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/poteyage/63007?q=poteyage#62296>
- ⁵ S.R.Turns, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill Education (2000). Capítulo 8.
- ⁶ Z. H. Lin. Capítulo 8, Thermohydraulic design of boiler components, en S. Kakac, Boilers, evaporators and condensers, John Wiley and Sons (1991).
- ⁷ C. Cortés, comunicación personal (2019).
- ⁸ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 7. External flow.
- ⁹ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 5. Transient conduction.
- ¹⁰ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 5, página 302, ecuación 5.49.
- ¹¹ V.Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M.Black, Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing), CRC Press. Capítulo 1.
- ¹² https://cdn.eldec.net/fileadmin/user_upload/user_upload/Dateien/produkt_prospekte/eldec_generator/eldec_generators_spanish_2017.pdf
- ¹³ F. Durst, D. Trimis, K. Pickenäcker, Compact Porous Medium Burner and Heat Exchanger for Household Applications, Universität Erlangen-Nürnberg.
- ¹⁴ http://www.promeos.com/cms/upload/pdf/Prospekte/promeos_beheizungsloesungen_Werkzeuge_e_web.pdf
- ¹⁵ <https://www.electricfor.com/en/50913/Downloads/Catalogue.htm>
- ¹⁶ J. Davies, Conduction and induction heating, P. Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers (1990), series 11. Capítulo 1. Fundamentals.
- ¹⁷ E. O. Doebelin, Measurement Systems. Application and Design, 4^a edición, McGraw-Hill (1990). Páginas 678-681.
- ¹⁸ Serope Kalpakjian y Steven Schmid ,Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5^a Edición (2008). Capítulo 11. Página 285-288.
- ¹⁹ Serope Kalpakjian y Steven Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5^a Edición (2008). Capítulo 10. Página 276.
- ²⁰ <http://www.raquelserrano.com/apuntes-2/segundo/procesos-industriales/>. Capítulo 10. Defectos en piezas fundidas. Página 4.

²¹ UNE-EN 12258-1:2012. Aluminio y aleaciones de aluminio. Términos y definiciones. Parte 1: Términos generales.

²² Plan de Autoprotección Contra Incendios y de Evacuación. Anexo VII. Planos (empresa AlumalSA).

²³ Plan de Autoprotección Contra Incendios y de Evacuación. Instalación de gas natural (empresa AlumalSA).

²⁴ Incropera & DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Wiley (1989). Capítulo 6. Introduction to convection.

²⁵ Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Parte 17. (Octubre 2008).