

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN HORNO
CREMATORIO EN UNA NAVE INDUSTRIAL
(Design and installation of a crematory in an
industrial unit)**

Para acceder al Título de

**GRUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Adrián Gómez Díaz

Julio - 2015



TÍTULO	Diseño e instalación de un horno crematorio en una nave industrial		
AUTOR	Adrián Gómez Díaz		
DIRECTOR / PONENTE	Delfín Silió Salcines		
TITULACIÓN	<i>Grado en ingeniería en tecnologías industriales</i>	FECHA	10-7-2015

PLABRAS CLAVE

Horno.
Crematorio.
Combustión.
Simulación.
CFD.
Refractario.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se pretende diseñar un horno crematorio que trabaje en un intervalo de temperaturas tales que permitan la cremación en un periodo de tiempo adecuado y que además resulte competitivo en el mercado, para lo cual tiene vital importancia la estructura y los materiales seleccionados, que deberán ser capaces de soportar esas temperaturas, así como el combustible elegido. Otro punto crítico son las emisiones y las normativas relativas a ellas, cuyo cumplimiento condiciona todo el proceso de diseño. La instalación se completa con el diseño de la chimenea y de los sistemas de control y realimentación, así como con la selección del equipo como ventiladores e instrumentos de medición.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto trata del diseño y construcción de un horno crematorio para su instalación en una nave industrial propiedad de un tanatorio.

Para la realización del proyecto se llevan a cabo, en primer lugar, una serie de cálculos previos que permiten definir la geometría del horno y dimensionar las cámaras que lo componen.

A continuación, se analiza el proceso de combustión que tiene lugar en los quemadores del horno, determinando el exceso adecuado de aire, la composición de los gases resultantes del proceso así como su temperatura y el flujo másico de estos que entra al horno en función de la potencia. También se calculan los valores que toman varias propiedades de los gases a distintas temperaturas.

Partiendo del supuesto más desfavorable se determinan los materiales de las paredes del horno, así como su espesor; de tal manera que la estructura pueda soportar las altas temperaturas y se cumplan las normativas vigentes. Para ello se calculan los coeficientes de convección y radiación tanto en el interior como en el exterior del horno y se recurre a la analogía eléctrica de la transferencia de calor.



Con todos estos datos se diseña un modelo inicial del horno con el programa de diseño CAD *SolidWorks*, el cual permite llevar a cabo simulaciones del comportamiento térmico durante el calentamiento con la herramienta *Flow Simulation*. Se llevan a cabo varias simulaciones con distintos flujos máxicos de entrada para determinar cuál es la potencia más adecuada de los quemadores para garantizar un funcionamiento óptimo del horno, con un periodo de calentamiento aceptable.

Estas simulaciones permiten observar las temperaturas a la salida del horno y a partir de ellas calcular y añadir al modelo una chimenea de evacuación de gases capaz de soportar dichas temperaturas y cumplir a la vez con la normativa.

Se añade, a continuación, el sistema de realimentación, que se diseña de forma que minimice la potencia de los ventiladores. Se determinan las características de los ventiladores tanto del sistema de realimentación como de los quemadores.

Una vez diseñado el modelo final del horno, se añaden los sistemas de control necesarios para garantizar un funcionamiento seguro. Estos sistemas aseguran que la temperatura y la velocidad en el interior del horno no superen los valores límite establecidos. Se realizan una serie de simulaciones en estado transitorio que permiten observar el proceso de calentamiento y validar los sistemas de control.

Finalmente, se llevan a cabo simulaciones con el sistema de realimentación activado para comprobar su funcionamiento y predecir las circunstancias que se darán en el interior del horno durante la cremación.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

Presupuesto de Ejecución Material = 32392,24 €

Presupuesto de Ejecución por Contrata = 47292,67 €

Presupuesto para el Conocimiento de la Administración = 52967,79 €

BIBLIOGRAFÍA

- *Combustibles y refractarios*, J. D. Gilchrist, Editorial Alhambra, S.A.
- *Hornos*, J. D. Gilchrist, Editorial Alhambra, S.A.
- *Guía técnica: diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*, IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- *Fundamentos de transferencia de calor*, Frank P. Incropera & David P. De Witt, Pearson Prentice Hall.
- *Fundamentos de Electro-Óptica para ingenieros*, Glenn D. Boreman.
- *Fundamentos de combustión*, José María Desantes Fernández & Magín Lapuerta Amigó.
- *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*, W.H. Severns.

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA

1.1 ANEXO A: PRECÁLCULOS DEL HORNO

1.2 ANEXO B: CÁLCULOS DEL CALENTAMIENTO CON *SOLIDWORKS*

2. PLANOS

3. PLIEGO DE CONDICIONES

4. PRESUPUESTO

5. BIBLIOGRAFÍA

MEMORIA

ÍNDICE

1 OBJETO DEL PROYECTO	3
2 ANTECEDENTES	4
2.1 EMPLAZAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LA NAVE	4
2.2 CAPACIDAD	5
3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	6
4 CONTENIDO Y LÍMITES DEL PROYECTO	7
5 TEMPERATURA DE TRABAJO	8
6 ENERGÍA CALORÍFICA	9
6.1 HORNOS ELÉCTRICOS	9
6.1.1 Hornos de resistencia	9
6.1.2 Hornos de arco	10
6.1.3 Horno de inducción	10
6.2 HORNOS DE LLAMA	10
6.3 COMBUSTIBLE ELEGIDO	11
7.1 CÁMARA PRINCIPAL	13
7.2 CÁMARA SECUNDARIA	13
7.3 QUEMADORES	15
7.4 VENTILADOR DE AIRE	15
7.5 TERMOPARES	16
7.6 REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR	16
7.7 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE	17
7.8 SISTEMAS DE SEGURIDAD	17
8 CHIMENEA	18
8.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN	18
8.2 PLATAFORMA DE ACCESO	20

9 SUMINISTRO	22
10 MATERIALES Y ESTRUCTURA	23
10.1 LADRILLOS REFRACTARIOS	23
10.2 MORTERO REFRACTARIO	25
10.3 ACABADO EXTERIOR	25
10.4 CAPA AISLANTE	25
11 FUNCIONAMIENTO	26
12 TRANSFERENCIA DE CALOR	29
12.1 CONDUCCIÓN	29
12.2 CONVECCIÓN	30
12.3 RADIACIÓN	31
12.4 ANALOGÍA ELÉCTRICA	31

1 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es el diseño de un horno para su instalación en un crematorio, el cual está situado en una nave industrial que pertenece a una empresa funeraria. Se llevan a cabo una serie de cálculos para dimensionarlo y para garantizar su correcto funcionamiento.

Un horno es un dispositivo en el que se convierte la energía eléctrica o la energía química de un combustible en calor, el cual se emplea para incrementar la temperatura de aquellos materiales que se ponen en su interior y que son denominados carga. Se estudia el tipo de combustible más adecuado y, para completar el trabajo, también se diseña el resto de equipo necesario para la instalación, como es la chimenea y el sistema de realimentación.

Además, para realizar el diseño se recurre al software *SolidWorks*, que permite un análisis dinámico del fluido, pudiendo estudiar de esta manera el comportamiento de los gases resultantes de la combustión en situaciones normales de trabajo tanto en estado estacionario como en estado transitorio. Las herramientas de *SolidWorks* permiten también analizar la evolución de las temperaturas de las paredes que conforman el horno.

En los hornos crematorios, al igual que en el resto de hornos industriales, cobran vital importancia las emisiones y las normativas relativas a ellas, las cuales se tendrán en cuenta y condicionarán todo el proceso de diseño.

2 ANTECEDENTES

2.1 EMPLAZAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LA NAVE

El crematorio se instala en una nave situada en el polígono industrial Los Tánagos, en la localidad de Pesués, Cantabria. Concretamente, en la parcela número 6. Se encuentra junto a la carretera N-634, a un kilómetro de distancia de la salida número 269 de la Autovía del Cantábrico.

La superficie útil de la nave es de 655,88 m² distribuidos en dos plantas: baja y cabrete. La fachada principal tiene orientación noroeste y cuenta con dos accesos, ambos a la planta baja: uno de 4,2 m de ancho por 2,8 m de alto que permite el acceso del vehículo funerario a la entrada del transporte, y el otro de 1,8 m de ancho por 2,8 m de alto por el que se accede al Hall Recibidor.

La instalación del horno se sitúa principalmente en la planta baja, en las zonas del Horno y de Introducción al Horno. En la planta cabrete se sitúa la sala del Depósito de combustible si fuera necesario y la Sala de Ventilación.

El régimen de superficies es el siguiente:

Planta baja	
Hall Recibidor	100,81 m ²
Acceso planta superior	16,42 m ²
Pasillo	3,04 m ²
Vestíbulo Previo	9,69 m ²
Aseo Minusválidos	6,69 m ²
Aseo 1	11,36 m ²
Aseo 2	11,10 m ²
Salón de Despedida	53,94 m ²

Sala de Visionado	5,77 m ²
Entrada del Transporte	67,70 m ²
Corredor Acceso	17,90 m ²
Sala de preparación	37,39 m ²
Zona Introducción al horno	58,72 m ²
Zona Horno	47,80 m ²
Planta cabrete	
Área sin uso determinado	177,71 m ²
Sala del Depósito del Combustible	14,91 m ²
Sala de Ventilación	14,93 m ²
	655,88 m ²
<u>Total superficie útil</u>	
	480,59 m ²
<u>Total superficie construida</u>	

Tabla 1.

2.2 CAPACIDAD

El horno crematorio se diseña exclusivamente para la incineración de cadáveres con féretros exentos de cristal, zinc o cualquier otro tipo de herraje metálico.

Su capacidad productiva es de una cremación con un solo cadáver por proceso y sin un máximo de procesos por día.

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La cremación consiste en la práctica por la que se deshace un cuerpo muerto, quemándolo, lo que suele tener lugar en el denominado crematorio.

Aunque en nuestra región predomina aún el sepelio tradicional, se está presentando una tendencia en aumento hacia la opción de la cremación, especialmente en los últimos años, en los que la tasa de cremación de cadáveres se ha incrementado notablemente. Es por ello que cada vez son más las casas funerarias que solicitan la instalación de un crematorio propio, para no tener que contratar el trabajo con otras firmas y así ahorrar costes y ofrecer un mejor servicio.

No obstante, los crematorios, como el resto de instalaciones donde se realizan procesos de combustión, son una fuente contaminante, es decir, un lugar en el que se producen emisiones a la atmósfera. En las mismas cabe destacar tres contaminantes ambientales que son los que generan mayor preocupación: dioxinas, furanos y metales pesados como el mercurio.

Un problema añadido es que en el caso de los crematorios las referencias de publicaciones científicas o estudios de universidades acerca de estas emisiones y sus riesgos son escasos, especialmente si se comparan con las existentes sobre otras instalaciones de incineración, como las de residuos municipales, que resultan más numerosos. Estos generan dificultades a la hora de tomar medidas para diseñar un horno con un buen rendimiento desde el punto de vista del medio ambiente. Además, no existe una normativa a nivel nacional español que regule las emisiones de los crematorios y les ponga límites. Sin embargo, se hace necesario diseñar hornos crematorios con sistemas que permitan depurar y reducir los contaminantes en la medida de lo posible.

4 CONTENIDO Y LÍMITES DEL PROYECTO

Este proyecto abarca todo el proceso de diseño del horno, en función de las condiciones de trabajo. Se determina la potencia necesaria para realizar el proceso de cremación en un periodo de tiempo adecuado, y se dimensionan las paredes del horno en función de las temperaturas que se alcanzan en su interior. También se estudian y seleccionan los materiales más adecuados para construir los muros. El diseño del horno incluye la adecuación de su interior a la normativa vigente de emisiones de origen industrial y la inclusión de un sistema de optimización del proceso.

Se diseña además la chimenea en base a la normativa vigente, de modo que pueda soportar las altas temperaturas, evacuar los gases que salen del horno y esparcirlos en la atmósfera.

Tanto el horno como la chimenea se modelan con el software *SolidWorks*, que permite un análisis completo de las temperaturas, velocidades, presiones y otros parámetros que se dan durante el proceso de la cremación. Para ello, se realizan simulaciones que se centran en el proceso de calentamiento del horno. Queda fuera del análisis y del objetivo del presente proyecto la simulación del proceso de cremación, debido a la imposibilidad de simular este con las herramientas que ofrece *SolidWorks*.

5 TEMPERATURA DE TRABAJO

Por razones económicas, las temperaturas que se alcanzan en el interior de un horno durante el proceso de cremación varían entre los 800°C y los 1150°C. Con estas temperaturas se consigue que una gran parte del cuerpo humano, especialmente los órganos y otros tejidos suaves, sean vaporizados y oxidados.

Pero esto no ocurre con los huesos, ya que para lograr la vaporización de los mismos se necesitarían temperaturas mucho más elevadas que dispararían el coste económico de la cremación por encima de los niveles asumibles. Es por ello que la cremación se realiza a temperaturas estables en torno a los 900°C, porque a estas temperaturas lo que se obtiene son fragmentos secos de hueso que representan menos de un 5 % del peso del cuerpo original. El proceso de cremación dura entre una a dos horas dependiendo del cuerpo, y lo que queda después son estos fragmentos de hueso que se caracterizan por ser duros, pero muy frágiles.

Entonces los fragmentos son llevados a un cremulador, el cual es una instalación independiente del horno, pero de obligada presencia en una instalación crematoria, ya que en ella se trituran los fragmentos de hueso para obtener las cenizas que finalmente son entregadas a la familia del difunto.

Teniendo todos estos aspectos en cuenta, se procede a diseñar el horno con una temperatura de trabajo de al menos 850°C y una temperatura máxima de 1100°C, de manera que el proceso de cremación dure entre una y dos horas. Las temperaturas superiores a la máxima deberán ser evitadas para no comprometer los materiales que conforman el horno.

6 ENERGÍA CALORÍFICA

El primer paso en el diseño es decidir de donde procede la energía calorífica requerida para el calentamiento. Se pueden distinguir dos tipos de energía para alimentar un horno: la energía eléctrica y la energía química de un combustible. La forma de calentamiento da lugar a la clasificación de los hornos en dos grandes grupos: hornos eléctricos y hornos de llama.

6.1 HORNOS ELÉCTRICOS

Se debe tener en cuenta que la energía eléctrica no es un combustible, sino que se trata de un sustituto que reemplaza a estos en muchas aplicaciones industriales. A nivel industrial, son tres los tipos de hornos eléctricos a considerar:

- Hornos de resistencia.
- Hornos de arco.
- Hornos de inducción

Todos ellos presentan ciertas ventajas obvias como son la ausencia de humos de combustión y también del peligro de explosiones, unas mejores condiciones de trabajo alrededor del horno y ambientales por el exterior, y una mayor seguridad del personal.

6.1.1 Hornos de resistencia

En este tipo de hornos la corriente eléctrica pasa a lo largo de un conductor que constituye la resistencia. Existe una gran variedad de materiales que se pueden utilizar para fabricar la resistencia, y que ofrecen diferentes propiedades. Sin embargo, en cualquiera de sus formas, su uso es escaso en la industria, debido al elevado consumo de electricidad que demanda, limitándose pues a experimentos en laboratorios, a pequeña escala, salvo en casos especiales.

6.1.2 Hornos de arco

Se trata de una forma especial de calefacción por resistencia, en la que la resistencia es el plasma creado en el espacio comprendido entre dos electrodos. Pese a que la masa de esta resistencia es pequeña, resulta indestructible y opera a temperaturas muy elevadas. Es por ello que este tipo de hornos resultan buenas soluciones en aquellos casos en los que la temperatura de llama que se necesita es tan alta que no se puede alcanzar por otros medios. En los procesos de cremación, sin embargo, la temperatura requerida no suele sobrepasar los 850°C, por lo que, al igual que en el caso anterior, no resulta rentable emplear este tipo de horno debido a su elevado coste.

6.1.3 Horno de inducción

Se trata también de un tipo especial de calefacción por resistencia. En este caso, la resistencia es la propia carga, en la cual se induce una corriente eléctrica. Se aplica principalmente en la fabricación de aceros especiales y de otras aleaciones de alto punto de fusión. Su uso para la cremación resulta demasiado costoso, como en los casos anteriores.

6.2 HORNOS DE LLAMA

Se decide diseñar un horno que emplea energía química extraída de un combustible debido al elevado coste y demanda de electricidad de un horno eléctrico, que hace que su uso no resulte rentable salvo en casos especiales o en grandes industrias.

Los hornos de llama emplean un combustible que es introducido en la cámara y que arde en presencia de una chispa, que es apagada una vez que el combustible ya está ardiendo.

6.3 COMBUSTIBLE ELEGIDO

La mayor parte de los combustibles son "combustibles fósiles", siendo las excepciones escasas y para usos muy restringidos. Una primera clasificación podría distinguir entre combustibles sólidos como el carbón, líquidos como el petróleo y gaseosos como el gas natural.

En cualquiera de los casos, el diseño del horno es similar, habiendo incluso hornos comerciales que admiten varios tipos de combustible sin que sea necesaria ninguna modificación del mismo. Las diferencias aparecerán a la hora de tener en cuenta el quemador, el depósito utilizado y el suministro. Así pues, la elección del combustible más adecuado se reduce primordialmente a una cuestión de precio y disponibilidad.

El carbón no se considera en este caso ya que se trata de un sector claramente en declive, y las dificultades para instalar un sistema así son numerosas y encarecerían el proyecto enormemente.

Los combustibles como la gasolina o el gasoil son una buena opción. Dado que el consumo es elevado, el menor precio del gasóleo hace que sea más adecuado.

En el mercado existen tres tipos de gasóleo: gasóleo A, B y C. El A y el B están más refinados y son adecuados para vehículos, mientras que el C tiene un mayor poder calorífico, ya que está concebido para proporcionar calor, al tener una mayor cantidad de parafina. Además, es el más barato de los tres, por lo que es la opción más atractiva.

También se debe considerar el gas natural, que es el combustible más barato en el caso de que el polígono cuente con una red de suministro del mismo. En caso contrario se descartaría su uso, ya que recurrir a botellas o bombonas resultaría extremadamente costoso dado el elevado consumo de un horno industrial. Se da el hecho de que el polígono seleccionado para el emplazamiento del crematorio sí tiene suministro de gas natural, por lo que se diseña el horno de forma que funcione con este combustible, al ser la opción más cómoda y barata.

7 HORNO

El horno crematorio se debe diseñar de manera que durante la cremación se consiga la adecuada eliminación del ataúd y de los restos humanos, cumpliendo con las normativas vigentes y legislación de emisión de gases de combustión locales.

Se ha de diseñar un horno capaz de reducir el cuerpo a una ceniza inerte de alta calidad de manera eficaz, pero a la vez para que resulte competitivo en el mercado se ha de minimizar la labor necesaria requerida para su funcionamiento, con un diseño sencillo que garantice una fácil operación.

Así, se concibe un horno crematorio en el que la estructura principal consiste en dos cámaras de combustión: una principal donde se quema la carga y otra secundaria que sirve para volver a quemar los gases procedentes de la primera de tal manera que las emisiones a la atmósfera sean menos dañinas. Cada una de las cámaras cuenta con su respectivo quemador, y será necesario diseñar el paso de una a otra.

La inclusión de la cámara secundaria responde a la necesidad de cumplir con las condiciones establecidas en la normativa vigente de emisiones. Este punto se tratará con mayor detalle en los apartados correspondientes a la cámara secundaria.

Además, el sistema de ventilación ha de permitir alcanzar y mantener las condiciones óptimas de temperatura en cada instante. En el horno, el aire del ambiente se emplea por medio de dos vías:

- Los quemadores toman aire del ambiente para realizar la combustión con un exceso de aire.
- Un sistema de ventilación de realimentación toma aire del ambiente y lo mezcla con parte de los gases calientes que salen por la chimenea, que son recuperados para introducirlos junto con el aire de nuevo en el horno.

7.1 CÁMARA PRINCIPAL

La cámara principal es donde tiene lugar la combustión principal y tiene unas dimensiones amplias para que el ataúd pueda ser introducido cómodamente.

La cámara tiene forma rectangular, y el techo es arqueado. En uno de sus extremos de menor anchura se practica un orificio también rectangular, de grandes dimensiones, donde se colocará la compuerta de entrada. En el extremo opuesto, se practica un agujero circular a media altura que servirá para acoplar el quemador principal. A la salida de este es donde se produce la chispa con unos electrodos para encender la llama al principio del proceso.

Un orificio en la pared sirve de entrada al termopar que mide la temperatura en la cámara principal.

Además, una serie de orificios en una de las paredes laterales y en el arco superior sirven de entrada a gases calientes procedentes de la chimenea que permite redirigir el flujo para una combustión óptima de la carga, además de servir también para mantener las altas temperaturas durante el proceso de cremación sin un consumo extra de combustible.

Finalmente, un puerto de transferencia permite el paso de los gases de desecho producidos a la cámara secundaria. Este puerto está formado por varios orificios rectangulares situados en la pared lateral opuesta a los orificios del párrafo anterior, de tal manera que los gases son empujados hacia la cámara secundaria.

7.2 CÁMARA SECUNDARIA

Los gases de desecho salen de la cámara principal por el puerto de transferencia y descienden al interior de la zona de combustión secundaria, la cual cuenta con su propio quemador. Aquí se lleva a cabo la combustión completa y la depuración de los gases, garantizando una permanencia de los gases en la cámara durante un mínimo de 2 segundos y a una tempe-

ratura de al menos 850°C gracias a la acción del quemador, de tal manera que se cumpla lo establecido en el Real Decreto 816/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Es por esto que la cámara secundaria se diseña con un amplio volumen, y consiste en una serie de pasos por debajo y a un lado de la cámara principal, por los que los gases van serpenteando durante la post-combustión. El primer paso se sitúa al lado de la cámara principal, en un lateral de la misma, y de ahí los gases pasan al siguiente paso situado justo debajo, para después ir avanzando por debajo de la cámara hasta llegar al extremo opuesto, donde se sitúa la salida. El orificio para el quemador secundario se encuentra en el primer paso inferior, facilitando el empuje de los gases.

Además, la cámara cuenta con un suministro de gases calientes igual al de la cámara principal, que permite aumentar el control sobre la temperatura y la velocidad de los gases. Los orificios se sitúan en este caso en la cara superior del primer paso.

El propósito de la cámara secundaria es conseguir la post-combustión de los gases que salen de la cámara principal, esto es, la combustión completa de aquellos inquemados que lleguen de la cámara principal y que son sumamente contaminantes. Al mismo tiempo estos gases hacen un largo recorrido antes de salir finalmente por la chimenea al exterior. De esta manera, todos gases y olores generados durante el proceso de incineración son eliminados. Esto permite el cumplimiento de los requisitos medioambientales y de límites de emisiones que impone la normativa, suponiendo un ahorro en mecanismos adicionales o filtros que serían de otra forma necesarios. Además, también mejora las condiciones de trabajo y la imagen de la empresa, suponiendo un gran beneficio a medio y largo plazo.

7.3 QUEMADORES

Un quemador es un equipo donde se realiza la combustión. En él se quema un combustible, ya sea gaseoso o líquido, y se genera con ello una llama que es la encargada de producir calor. El proceso de combustión se explica más detalladamente en el *Anexo A*. En el caso de este proyecto, se necesitan dos quemadores de gas natural.

Ambos quemadores se encuentran instalados en la parte posterior del horno, facilitando así su acceso para cuestiones de mantenimiento y reparación, así como permitiendo un fácil acoplamiento de los mismos a los orificios practicados en las cámaras para tal efecto.

El orificio de la cámara principal se encuentra a baja altura, con la intención de que el calor salga expulsado directamente hacia el ataúd situado justo en frente.

Por su parte, el de la cámara secundaria se sitúa a mayor altura para calentar los gases de una forma más uniforme.

Ambos cuentan con su propio sistema de ventilación, tomando mediante ventiladores aire del ambiente, que después introducen junto con el combustible en las cámaras.

La potencia requerida se determina posteriormente. Dado que a mayor potencia mayor es el coste de los quemadores, se debe adoptar una posición de equilibrio entre una potencia lo suficientemente elevada para permitir el control sobre la temperatura dentro del horno y un coste moderado.

7.4 VENTILADOR DE AIRE

Además del sistema de ventilación integrado en los quemadores, se diseña un sistema adicional, que permite facilitar el control sobre la velocidad y la temperatura dentro del horno. El sistema consiste en un conducto que aspira parte del gas que sale por la chimenea gracias a la acción de un ventilador situado sobre el horno, mientras que otro ventilador aspira

aire del ambiente. Los gases y el aire aspirados se mezclan y son conducidos mediante tres válvulas moduladoras de control a las cámaras. Estas válvulas se ajustan para permitir un mayor o menor paso según las condiciones. La primera regula el paso superior en la cámara principal. La segunda regula el paso lateral en la cámara principal. La tercera regula el paso en la cámara secundaria.

Ambos ventiladores son también regulables, de modo que se pueda controlar que porcentaje de la realimentación es aire y que porcentaje son gases calentados. También se puede cerrar por completo el sistema de realimentación, por ejemplo, durante el calentamiento del horno, cuando el ataúd no se ha introducido aún.

Al usar gases de la chimenea en vez de solo aire exterior en la ventilación se aumenta la eficiencia, ya que dichos gases están ya calentados.

El uso del aire superior sirve para dirigir el calor hacia el torso del cuerpo, donde se sitúa la mayoría de la grasa corporal. El aire lateral permite re-dirigir el calor hacia el cuerpo y la cámara secundaria. El aire de la cámara secundaria evita la aparición de zonas con bajas temperaturas y velocidades en el paso superior de la misma.

7.5 TERMOPARES

Se instalan dos termopares que permitan conocer la temperatura en cada instante en la cámara principal, y en la cámara secundaria. Existe una gran variedad de termopares con diferentes características. Dada la gama de temperaturas que se van a dar en el horno, se elige un termopar tipo K, que tiene un rango de temperaturas de -200°C a 1372°C .

7.6 REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR

El regulador o sensor monitoriza en todo momento cualquier condición de sobrepresión dentro de la cámara de combustión. Si se detecta dicha sobrepresión, el aire que entra al horno se cierra, por lo que la combustión

dentro del horno se reduce rápidamente. Se trata pues de un sistema de parada de emergencia.

7.7 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

El controlador es capaz de realizar el control total del horno y todas sus funciones, una vez que el féretro ha sido cargado en el interior de la cámara de combustión.

7.8 SISTEMAS DE SEGURIDAD

Es necesario instalar diferentes dispositivos para garantizar la seguridad de la instalación y de los trabajadores:

- Relés de seguridad: cierran automáticamente las válvulas que suministran el combustible y el aire a los quemadores.
- Enclavamientos eléctricos: impiden que la compuerta de entrada a la cámara principal se pueda abrir cuando la temperatura en el interior es demasiado elevada.
- Conmutadores: apagan los quemadores si la presión desciende por debajo de niveles preestablecidos.

8 CHIMENEA

8.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN

A través de la chimenea se evacúan los gases que salen de la cámara secundaria hacia el exterior. Consiste en un cilindro vertical cuya altura debe sobresalir por encima del techo de la nave industrial.

Es en la chimenea donde se sitúan los equipos de medición de contaminantes y otras partículas. En la actualidad, la Consejería de Medio Ambiente no obliga a disponer de sistemas de medición en continuo (que están realizando continuamente medidas), sino que basta con que la chimenea cuente con los orificios e instalaciones necesarias para permitir la toma de medidas del nivel de emisiones durante las inspecciones llevadas a cabo por el organismo competente.

El Decreto 50/2009, de 18 de junio, por el que se regula el control de la contaminación atmosférica industrial en la Comunidad Autónoma de Cantabria establece que para todas las condiciones de altura de chimeneas, equipos de mediciones y toma de muestras en chimeneas, así como situación, disposición de conexiones y accesos se debe cumplir lo dispuesto en la Orden de 18 de octubre de 1976, de Prevención y Corrección de la Contaminación Atmosférica de Origen Industrial.

Conforme a dicha norma, las mediciones se realizarán en un punto situado al menos a dos diámetros del extremo emisor de la chimenea, siempre cumpliéndose que cualquier perturbación del flujo de gas que se encuentre antes del punto de medición esté al menos a ocho diámetros de distancia.

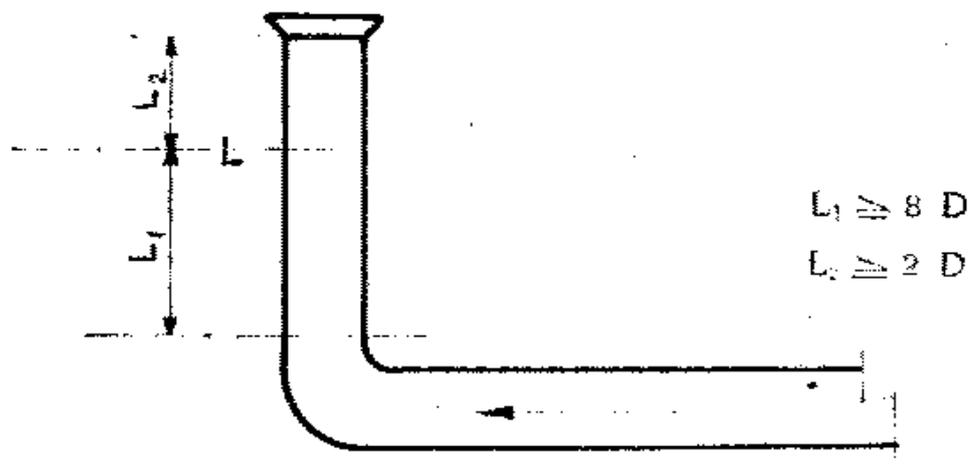
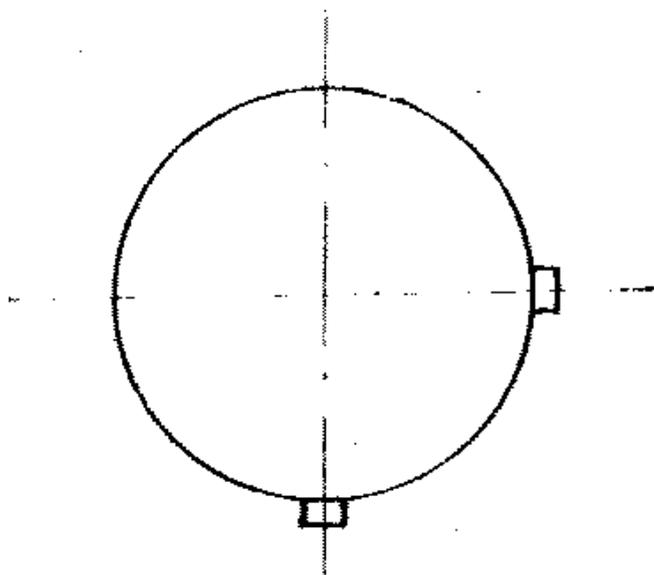


Figura 1

En los puntos donde se realiza la toma de muestras se practican unos orificios circulares para facilitar la introducción de los equipos de medición. Dichos orificios deberán contar con un casquillo roscado de 100 mm de longitud y de DN=100 o mayor, para permitir acoplar la tapa correspondiente. Este casquillo debe ir soldado a tope.

Siguiendo la orden ministerial, en las conexiones se dispondrán las tapas metálicas correspondientes (macho o hembra). Se practicarán dos agujeros con sus correspondientes conexiones, los cuales estarán situados según diámetros perpendiculares.



La construcción de la cámara secundaria tiene como principal objetivo la depuración de los gases de combustión de manera que no se superen los límites de emisiones de contaminantes, que en Cantabria son fijados por la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Urbanismo. Los valores límite son los siguientes:

Contaminante	Valor límite de emisión ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
Partículas	50
Opacidad	2 (Índice Bacharach)
CO	250
NOx	500
SO ₂	200
COT	20
HCl	60
Hg	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabla 2.

No obstante, la comprobación de que efectivamente durante el proceso de cremación no se superan los límites de emisiones de cada contaminante escapa del objetivo del presente proyecto, pudiendo ser necesario adoptar medidas adicionales como filtros de contaminantes una vez que el horno ya funciona con normalidad y se pueden medir sus emisiones.

8.2 PLATAFORMA DE ACCESO

Para poder llevar a cabo las mediciones durante las inspecciones se hace necesario disponer de una plataforma de acceso a los orificios de medición, debido a la elevada altura a la que estos se sitúan en la chimenea. La orden ministerial también regula este apartado. Siguiendo las indicaciones de la misma, la plataforma se debe situar a una distancia por debajo de las tomas mayor que 60 cm pero inferior a 1 m. Además, la plata-

forma deberá ser tal que dos operarios puedan trabajar fácilmente, siendo la construcción fija y con barandillas de seguridad.

9 SUMINISTRO

Como ya se decidió en el apartado 6.3, el combustible con el que funciona el horno es gas natural. El polígono industrial donde se emplaza la nave cuenta con una red de suministro de este combustible, por lo que la alimentación del horno se realiza a partir de una acometida a la red general de suministro. A partir de esta se debe proporcionar la cantidad de combustible necesaria a los dos quemadores con los que cuenta el horno.

10 MATERIALES Y ESTRUCTURA

10.1 LADRILLOS REFRACTARIOS

El término refractario hace referencia a la capacidad que poseen ciertos materiales de resistir temperaturas muy elevadas durante un periodo de tiempo sin cambiar de estado ni descomponerse, manteniendo sus propiedades físicas y químicas.

Es necesario construir las paredes internas de un horno con ladrillos de este tipo de materiales, ya que de otra forma la vida útil del horno sería muy reducida. Su objetivo será doble: por un lado proteger de las altas temperaturas, y por el otro minimizar en la medida de lo posible la pérdida de calor en el interior del horno hacia el exterior.

Existen muchos criterios para clasificar a los refractarios. El más utilizado se basa en el comportamiento respecto a las escorias metalúrgicas, distinguiendo cuatro tipos:

- Refractarios ácidos: se basan en SiO_2 e incluyen las arcillas de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla.
- Refractarios básicos: están basados en el contenido en MgO . Dentro de este grupo se encuentran la dolomita, magnesita y también las briquetas de alúmina.
- Refractarios neutros: se suelen utilizar para separar refractarios ácidos de los básicos, debido a que son relativamente inertes a las escorias de ambos, por lo que pueden evitar que uno ataque al otro.
- Refractarios especiales: se trata normalmente de materiales nuevos y caros, por lo que solo se suelen utilizar para labores de investigación y desarrollo, u otros usos aislados.

También se pueden clasificar según su forma, distinguiéndose entonces entre refractarios conformados como pueden ser los ladrillos o cuñas y

refractarios no conformados como los cementos. Para construir la estructura del horno se necesitan refractarios conformados en forma de ladrillos.

El tipo más común de ladrillos refractarios que se encuentran en el mercado se fabrican con arcillas refractarias cuyos principales componentes son el SiO_2 (sílice) y el Al_2O_3 (alúmina). También se pueden encontrar la magnesita o la dolomita. Según los porcentajes de cada componente se distingue entre:

- Ladrillos refractarios: son ácidos que cuentan con un porcentaje de alúmina de entre el 26 y el 46 %.
- Ladrillos refractarios con alto contenido de sílice: son ácidos que cuentan con al menos un 90 % de Sílice.
- Ladrillos refractarios con alto contenido de alúmina: cuentan con al menos un 46 % de alúmina y son neutros.
- Magnesita: refractario básico con más de un 90 % MgO .
- Dolomita: refractario básico compuesto por MgO y CaO .

Para la elección del tipo de ladrillo empleado hay que tener en cuenta que la temperatura máxima de los gases en la cámara principal y secundaria se establece en 1100°C .

Los ladrillos con alto contenido de Sílice soportan altas temperaturas pero se dilatan más que otros al ser sometidos a ciclos de calor-frío, pudiendo llegar a desintegrarse. Es por esto que se emplean en hornos donde las temperaturas altas son continuas. En el horno crematorio, en cambio, la temperatura es en general muy variable, por lo que este tipo de ladrillos no son los adecuados.

Los ladrillos refractarios y refractarios con alto contenido en alúmina tienen coeficientes de dilatación térmica bajos, por lo que no se deforman como los anteriores. Cuanto mayor sea el contenido de alúmina más caros son, pero mayor es su calidad. Además, tienen la ventaja de ser iner-

tes a las escorias, por lo que los ladrillos con alto contenido en alúmina resultan los más convenientes para el horno crematorio.

10.2 MORTERO REFRACTARIO

Se hace necesario recurrir a un mortero refractario para montar y anclar los ladrillos refractarios. Dicho mortero ha de ser capaz también de soportar la temperatura máxima que se pueda dar en el horno.

10.3 ACABADO EXTERIOR

Los ladrillos refractarios del horno se revisten con paneles de acero, que otorgan una mejor apariencia al horno, y además evitan el contacto fortuito con las partes del interior que puedan resultar peligrosas.

10.4 CAPA AISLANTE

Entre los paneles de acero y los ladrillos refractarios se coloca una capa de material aislante térmico. Este material es fundamental, ya que sus valores de conductividad térmica a altas temperaturas son muy pequeños, por lo que se logra una reducción drástica de la temperatura, de tal manera que la temperatura que se aprecia alrededor del horno es lo suficientemente baja para permitir unas condiciones de trabajo normales para los operarios.

En el mercado se pueden encontrar numerosos modelos de diferentes características y espesores, siendo fundamental la elección de un aislante con las propiedades óptimas para las condiciones de trabajo que se dan en el horno.

11 FUNCIONAMIENTO

El ciclo de funcionamiento del horno se diseña de forma que siga estos pasos:

- Partiendo de una temperatura ambiente en el interior del horno, que está vacío, comienza el mismo proceso en ambas cámaras: el quemador se enciende, salta la chispa y comienza a entrar el combustible a la cámara. Se enciende la llama y comienza el proceso de combustión, aumentando la temperatura progresivamente en ambas cámaras.

- Los quemadores siguen funcionando hasta que los termopares detectan que se han alcanzado temperaturas suficientemente altas en ambas cámaras. Entonces, la compuerta de entrada de los ataúdes, que había permanecido bloqueada hasta entonces, podrá abrirse.

- Si no se abre inmediatamente la compuerta, ambos quemadores seguirán funcionando hasta que los termopares detecten que las temperaturas rebasan el límite superior establecido, apagándose entonces el quemador correspondiente. Si el mismo termopar detecta posteriormente que la temperatura ha caído por debajo del límite inferior, se encenderá de nuevo el quemador. Cada termopar está asociado a un quemador y su funcionamiento es independiente.

- Cuando la carga esté lista, se abrirá la compuerta y se introducirá el ataúd, el cual se deslizará hasta el interior para que, una vez introducido del todo, se vuelva a cerrar la compuerta. Como medida de seguridad adicional, el software apagará el quemador principal mientras la compuerta esté abierta.

- Empieza entonces el proceso de cremación. Las altas temperaturas en el interior del horno y la acción del quemador si en ese instante estuviera encendido provocan que la carga comience a arder. Una vez el quemador se apague al detectar el termopar que la temperatura se aproxima al límite superior, la caída de temperatura no será tan brusca como anteriormente, ya que la propia energía liberada por la carga junto con la energía

radiada por las paredes a altas temperaturas mantendrá la temperatura en el interior. A este hecho ayuda también el sistema de ventilación de realimentación, que permanece apagado hasta que se introduce el ataúd, y que proporciona aire caliente y oxígeno para que la cremación pueda continuar sin necesidad de que el quemador principal se encienda de nuevo. Este es el objetivo que se busca, aunque el quemador principal se encenderá de todas formas si el termopar detecta que la temperatura cae por debajo del límite inferior.

- Al comenzar la cremación se activa otro sistema de control: el sistema de control de velocidad. Este detecta si las velocidades en la cámara secundaria son demasiado altas, apagando los quemadores en tal caso hasta que la velocidad o la temperatura caigan por debajo de los límites establecidos. Se asegura así el cumplimiento de la normativa de permanencia de los gases de combustión en la cámara secundaria.

- Conforme el proceso va avanzando, el calor liberado por la carga va disminuyendo, por lo que podría ser que el quemador principal se encendiera con mayor frecuencia para mantener una temperatura adecuada y facilitar el último tramo de la cremación.

- La compuerta de entrada cuenta con una pantalla térmica que permite observar el interior de la cámara principal. Cuando el operario observa que el proceso de incineración ha finalizado y la célula fotovoltaica conectada al CLP así lo confirma, se procede a abrir la compuerta y extraer los restos de la cremación, los cuales necesitarán un proceso de enfriamiento primero en el horno y después en el exterior antes de ser finalmente dispuestos.

- La ley obliga a que las cremaciones sean individuales. Está prohibido mezclar los restos o introducir otra carga mientras una está aún incinerándose en el interior. Por este motivo, y también por razones de seguridad, la compuerta de entrada permanecerá bloqueada mientras dure el proceso de cremación, solo pudiendo ser abierta una vez este ha finalizado.

- La duración de una cremación se estima en unos 45 minutos de precalentamiento y entre 60 y 120 minutos de cremación propiamente dicha.

12 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor consiste en el paso de energía térmica desde un cuerpo que se encuentra a mayor temperatura hacia otro que se encuentra a menor temperatura. En el caso del horno crematorio, la transferencia de calor se produce desde el interior del mismo, que se encuentra a altas temperaturas, hacia el exterior que se encuentra a temperatura ambiente. En este caso se dan los tres modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

12.1 CONDUCCIÓN

La conducción consiste en la transferencia de calor entre dos puntos de un mismo cuerpo a distinta temperatura, no habiendo transferencia de materia entre ambos. Debido a las interacciones entre las partículas, se produce una transferencia de energía de las partículas más energéticas (esto es, aquellas a mayor temperatura) a las menos energéticas (a menor temperatura).

En el horno crematorio la conducción se produce en la pared del horno, al producirse una transferencia de calor desde la pared interna que está a mayor temperatura hacia la pared externa que está a una temperatura menor. Dadas las grandes dimensiones de las paredes en comparación con el espesor de las mismas, se puede considerar el problema como de transferencia unidimensional.

En estas condiciones, la conducción del calor en las paredes del horno se puede determinar por la ley de Fourier, la cual establece que el flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área con una distribución de temperaturas lineal es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección, es decir:

$$q = -k \times \left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right)$$

Donde:

- q es el flujo de calor (W/m^2).
- k es la conductividad térmica, una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Se mide en $W/m K$.
- T_1 y T_2 representan la distribución de temperaturas en K.
- L es la longitud o espesor del muro en m.

El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

12.2 CONVECCIÓN

En la convección un fluido en movimiento transporta energía en forma de calor entre dos zonas a distinta temperatura. El fluido puede ser tanto un gas como un líquido. Se incluye la transferencia de calor que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando ambos se encuentran a distintas temperaturas.

Dentro de la convección se distingue la convección forzada y la natural. La primera se da cuando se mueve el fluido mediante intervención humana desde una zona caliente hacia una zona fría. La segunda cuando es el propio fluido el que cambia su densidad haciendo que el calor se desplace hacia la zona más fría, sin intervención humana.

En el caso del horno crematorio el fluido es un gas, y la convección incluye tanto el intercambio de energía entre el gas caliente del interior de la cámara y la superficie interior de la misma así como el intercambio de energía entre la superficie exterior del horno y el aire. La primera es una convección forzada, y la segunda es natural.

La transferencia de calor por convección se modela con la siguiente fórmula, conocida como ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h \times (T_s - T_{inf})$$

Donde:

- q es el flujo de calor por convección (W/m^2).

- T_s y T_{inf} son las temperaturas en K de la superficie y del fluido, respectivamente.
- h es el denominado coeficiente de transferencia de calor por convección, que se mide en $W/m^2 K$ y que depende de las condiciones en la capa límite.

12.3 RADIACIÓN

Se denomina radiación térmica a la energía que es emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. La energía se propaga en forma de ondas electromagnéticas sin necesidad de la presencia de un medio material, a través del vacío.

Una superficie que emite radiación libera energía a una determinada velocidad, que se puede obtener mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \times T_s^4$$

Donde:

- E es la denominada potencia emisiva superficial en W/m^2 .
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann, de valor $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$.
- T_s es la temperatura en K de la superficie emisora.

Esta fórmula se utiliza para cuerpos negros, que son radiadores ideales. Para el caso de superficies reales la fórmula cambia, como se desarrolla en los anexos a este documento.

12.4 ANALOGÍA ELÉCTRICA

La transferencia de calor es similar en muchos aspectos a la conducción de electricidad a través de los conductores eléctricos. Por ello, se puede recurrir en muchas ocasiones a una analogía para resolver problemas que involucren conducción, convección y radiación.

La diferencia de potencial en un conductor produce un flujo de electricidad de la misma manera que la diferencia de temperatura produce un flujo de calor.

Como ya se mencionó anteriormente, en la conducción de calor se obtiene el flujo de calor con la siguiente fórmula:

$$q = k \times \left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right); \text{ donde } T_1 > T_2$$

En el caso de conducción de electricidad, la ley de Ohm establece que la corriente eléctrica en amperios (A) es igual a la diferencia de potencial en voltios (V) entre la resistencia eléctrica en ohmios (Ω):

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}; \text{ donde } V_1 > V_2$$

Si se comparan ambas fórmulas se observa que el término L/k equivale a una resistencia, que se denomina resistencia térmica de conducción:

$$R_T = \frac{L}{k}$$

Procediendo de la misma manera con la convección, se compara la ley de Ohm con la ley de enfriamiento de Newton y se observa que el término $1/h$ equivale a una resistencia, que se denomina resistencia térmica de convección:

$$R_T = \frac{1}{h}$$

Esta analogía permite sustituir nuestro problema térmico por un circuito con resistencias en serie o en paralelo en la que cada una de ellas represente la transferencia de calor a través de un cierto material o fluido y con un modo de transferencia determinado.

ANEXO A:
PRECÁLCULOS DEL
HORNO

ÍNDICE

1 DIMENSIONADO	2
1.1 DIMENSIONADO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN PRINCIPAL	2
1.2 DIMENSIONADO DE LA CÁMARA SECUNDARIA.....	4
1.3 DIMENSIONADO DEL PUERTO DE TRANSFERENCIA.....	5
1.4 DIMENSIONADO DEL ORIFICIO DE LA CHIMENEA.....	6
1.5 DIMENSIONADO DE LOS QUEMADORES	6
1.6 DIMENSIONADO DE LOS ORIFICIOS DE VENTILACIÓN.....	6
2 COMBUSTIÓN	7
2.1 ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN	8
2.2 COMPOSICIÓN GASES DE COMBUSTIÓN.....	10
2.3 TEMPERATURA GASES DE COMBUSTIÓN.....	10
2.4 FLUJO MÁSIICO DE LOS QUEMADORES.....	13
2.5 PROPIEDADES GASES DE COMBUSTIÓN.....	15
3 CÁLCULOS DEL ESPESOR DE LAS PAREDES DEL HORNO	22
3.1 CÁLCULO DEL COEFICIENTE $h_{\text{conv rad,ext}}$.....	23
3.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE $h_{\text{conv rad,inte}}$.....	24
3.3 CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED EXTERNA.....	30
3.4 CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED INTERNA.....	31
3.5 CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA PARED INTERIOR DEL HORNO.....	32
3.6 CÁLCULOS DEL ESPESOR DE LOS MUROS	33
3.7 Espesor entre cámaras.....	35

1 DIMENSIONADO

1.1 DIMENSIONADO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN PRINCIPAL

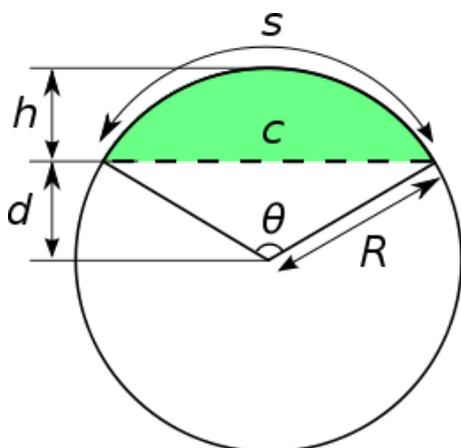
Las dimensiones de la cámara de combustión o cámara principal se eligen en función de las de la carga, es decir, el ataúd.

Según la norma UNE 190001 que indica la terminología, clasificación y características técnicas de los ataúdes, las medidas exteriores de un ataúd de incineración de uso común no deben exceder las siguientes: longitud de 200 cm, anchura de 70 cm y altura de 55 cm.

A partir de estos datos, se diseña una cámara de combustión principal que consiste en un prisma de dimensiones las que siguen: 260 cm de longitud, 100 cm de ancho y 100 cm de alto.

La altura de 100 cm es hasta el tope del arco, el cual se sitúa en la parte superior a lo largo de toda la cámara. Para que el arco este completamente definido es necesario establecer los siguientes parámetros:

- Su radio es $R = 70$ cm.
- Su centro se sitúa a 30 cm de la superficie inferior de la cámara principal.
- La longitud de la cuerda es $c = 100$ cm.



Con estos datos ya se pueden calcular el resto de parámetros que se necesitan:

$$c = 2 \times R \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Se despeja el ángulo central θ de la fórmula anterior:

$$\theta = 2 \times \arcsin\left(\frac{100}{2 \times 70}\right) = 1,59 \text{ rad}$$

La altura es:

$$h = R - R \times \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$h = 70 - 70 \times \cos\left(\frac{1,59}{2}\right) = 20,98 \text{ cm}$$

La longitud del arco s es:

$$s = R \times \theta$$

$$s = 70 \times 1,59 = 111,3 \text{ cm}$$

El área del segmento circular es:

$$A = R^2 \times \left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{R^2 \times \sin(\theta)}{2}$$

$$A_{\text{arco}} = 70^2 \times \left(\frac{1,59}{2}\right) - \frac{70^2 \times \sin(1,59)}{2} = 1445,95 \text{ cm}^2$$

El volumen se obtiene multiplicando el área por la longitud de la cámara:

$$V_{\text{arco}} = A_{\text{arco}} \times L = 1445,95 \times 260 = 375947,45 \text{ cm}^3$$

El área y el volumen correspondientes a la sección rectangular de la cámara son:

$$A_{\text{prisma}} = (100 - 20,98) \times 100 = 7902 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{prisma}} = A_{\text{prisma}} \times L = 7902 \times 260 = 2054520 \text{ cm}^3$$

El área total de la sección y el volumen de toda la cámara principal son:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{arco}} + A_{\text{prisma}} = 1445,95 + 7902 = 9347,95 \text{ cm}^2$$

$$V_{\text{total}} = V_{\text{arco}} + V_{\text{prisma}} = 375947,45 + 2054520 = 2430467,45 \text{ cm}^3$$

También se calcula el valor de la superficie de la pared, es decir, el área de ladrillo refractario que se encuentra en contacto con los gases de combustión. Para el arco se calcula así:

$$A_{arcosuperficie} = s \times L$$

$$A_{arcosuperficie} = 111,3 \times 260 = 28938 \text{cm}^2$$

La superficie de contacto para el resto de la cámara se obtiene de forma sencilla como suma de las áreas de los rectángulos que la forman:

$$A_{prismasuperficie} = 2 \times ((100 - 20,98) \times 100) + 2 \times ((100 - 20,98) \times 260) + 100 \times 260 = 82894,4 \text{cm}^2$$

La superficie total en contacto con los gases es:

$$A_{totalsuperficie} = A_{arcosuperficie} + A_{prismasuperficie}$$

$$A_{totalsuperficie} = 28938 + 82894,4 = 111832,4 \text{cm}^2$$

Se las unidades para expresarlo más cómodamente:

$$A_{totalsección} = 0,9348 \text{m}^2$$

$$V_{total} = 2,4305 \text{m}^3$$

$$A_{totalsuperficie} = 11,1832 \text{m}^2$$

1.2 DIMENSIONADO DE LA CÁMARA SECUNDARIA

La cámara secundaria se sitúa a un lado y por debajo de la cámara principal. Su misión es quemar los gases que llegan de la combustión, por lo que su estructura consiste en una serie de pasos serpenteantes, contenidos en dos prismas rectangulares.

El primer prisma al que llegan los gases al salir de la cámara principal es al lateral. Su altura coincide con la altura de la cámara principal. Su longitud es de 107,5 cm. Su anchura es de 20 cm. El suelo del prisma lateral cuenta en un extremo con un orificio rectangular de 20 cm de anchura por 40 cm de longitud, que sirve de paso de los gases hacia el segundo prisma, que es el inferior. Esta abertura está situada justo encima del orificio

por el que se acopla el quemador de la cámara secundaria, ya que de esta manera los gases son calentados e impulsados con mayor eficiencia.

La longitud del prisma inferior es la misma que la de la cámara principal, su anchura total es de 131,5 cm y su altura de 50 cm. El número de pasos existente en este prisma es de cuatro.

El primero se sitúa justo debajo del prisma lateral. El calentador se encuentra acoplado a la pared de este primer paso, en el mismo extremo que el calentador de la cámara principal. La anchura de este paso es de 20 cm. Un muro de 11,5 cm separa este paso del siguiente. Una abertura de 40 cm de longitud y altura 50 cm situada en el extremo opuesto al quemador permite a los gases avanzar al segundo paso. La anchura de este paso y de los otros dos restantes es de 25,67 cm. Las aberturas son iguales y se van situando en extremos opuestos para que los gases tengan que hacer todo el recorrido.

1.3 DIMENSIONADO DEL PUERTO DE TRANSFERENCIA

El puerto de transferencia se diseña inicialmente con cinco orificios rectangulares situados en la pared que separa la cámara principal y el prisma superior de la cámara secundaria. Dichos orificios se colocan más próximos al extremo donde se encuentra el quemador de la cámara secundaria que al otro, para que al atravesarlos los gases estos sean calentados con mayor efectividad.

Las dimensiones de todos los orificios son: 35 cm de alto por 10 cm de ancho. Se encuentran a una altura de 39 cm respecto de la base de la cámara principal, y la separación entre cada uno de ellos y entre el primero y la pared donde se encuentra el quemador secundario es de 11,5 cm.

152,5 cm de los 260 cm que tiene la pared quedan libres, pero esto resulta beneficioso como ya se comentó en el párrafo anterior.

1.4 DIMENSIONADO DEL ORIFICIO DE LA CHIMENEA

El orificio que da paso a la chimenea y que está situado en la cámara secundaria tiene una altura de 50 cm, una anchura de 40 cm y se encuentra al final del último paso.

1.5 DIMENSIONADO DE LOS QUEMADORES

El quemador principal se acopla mediante un orificio de 15 cm de diámetro, cuyo centro está situado a una altura de 20 cm en la mitad de la cámara principal.

El quemador secundario se acopla mediante un orificio idéntico al anterior, pero este está a una altura de 25 cm respecto al suelo de la cámara secundaria.

1.6 DIMENSIONADO DE LOS ORIFICIOS DE VENTILACIÓN

La cámara principal cuenta con siete orificios circulares de 5 cm de diámetro uniformemente distribuidos en la parte superior del arco, con una distancia de 32,5 cm entre cada centro.

Además también cuenta con siete orificios laterales de las mismas dimensiones y con una separación entre centros también de 32,5 cm. Sus centros se encuentran a una altura de 20 cm.

Por su parte, la cámara secundaria cuenta con tres orificios circulares practicados en la parte superior del prisma lateral, siendo el diámetro de cada uno de ellos de 5 cm y estando separados los centros de los orificios consecutivos por 32,5 cm.

2 COMBUSTIÓN

Se define la combustión como una reacción química exotérmica en la que se mezcla el combustible y el comburente, produciéndose humos de combustión, calor y luz. En el crematorio el combustible es gas natural y el comburente es el oxígeno del aire. La mezcla de ambas partes tiene lugar en los quemadores, que toman el aire a temperatura ambiente de la misma sala donde se encuentra el horno.

La combustión estequiométrica o teórica se produce cuando la totalidad del combustible reacciona con el comburente. La cantidad de aire necesaria y suficiente que garantiza la combustión completa recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico. Como consecuencia, se consume todo el O_2 por lo que este no se encontrará en los humos de combustión. Además, no se generan inquemados, que son sustancias tales como hollín o monóxido de carbono, que proceden de la combustión incompleta del combustible.

Sin embargo, en la práctica resulta imposible obtener una mezcla perfecta entre el combustible y el comburente, por lo que no todo el combustible reacciona, y aparecen inquemados en los gases de combustión. Para solucionar este problema se añade un exceso de aire, de tal manera que el aire aportado a la reacción es mayor al estequiométrico. Se consigue así una combustión más completa y con menos probabilidades de la aparición de inquemados cuanto mayor sea el exceso. No obstante, a mayor exceso menor es la temperatura que se puede alcanzar y por lo tanto menor es la eficiencia térmica que se obtiene.

En la actualidad se recurre a un punto de equilibrio entre ambos extremos que proporcione un funcionamiento óptimo. En el horno crematorio se supone un exceso de aire del 60 % ($\lambda=1,6$), que está dentro del rango (40 a 100%) que se suele considerar adecuado para procesos de cremación o incineración ya que son con los que se logra la máxima eficacia.

Para realizar los cálculos necesarios relativos a la combustión se debe partir de las composiciones del gas natural y del aire, las cuales se detallan a continuación:

Composición del gas natural		
Constituyente	Fórmula Química	Composición por volumen (%)
Metano	CH ₄	81,86
Etano	C ₂ H ₆	11,61
Propano	C ₃ H ₈	1,92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0,23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0,22
Nitrógeno	N ₂	0,9
Dióxido de carbono	CO ₂	3,18

Tabla 1. Fuente: Gas Natural Fenosa.

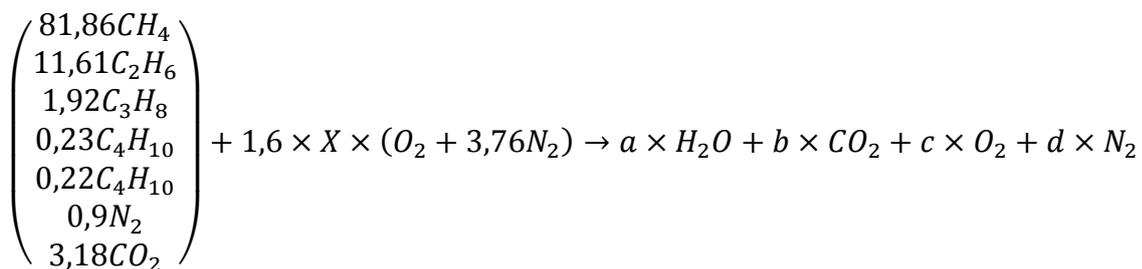
Composición del aire atmosférico		
Constituyente	Fórmula Química	Composición por volumen (%)
Nitrógeno	N ₂	78,08
Oxígeno	O ₂	20,95
Dióxido de carbono	CO ₂	0,04
Otros (Argón, Neón, etc.)	Ar, Ne, etc.	0,93

Tabla 2.

2.1 ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN

En primer lugar, se procede a calcular los coeficientes estequiométricos de la reacción química que tiene lugar en el quemador. A partir de la compo-

sición volumétrica del combustible y del aire y tomando como base 100 moles de combustible se obtiene la siguiente reacción:



Donde 1,6 representa el exceso de aire del 60% y X el aire estequiométrico.

Siguiendo la ley de conservación de la materia según la cual la cantidad de átomos de cada elemento debe ser igual a ambos lados, se plantean las siguientes ecuaciones para cada elemento con el objetivo de obtener los coeficientes estequiométricos que se desconocen:

$$\text{Hidrógeno: } 4 \times 81,86 + 6 \times 11,61 + 8 \times 1,92 + 10 \times 0,23 + 10 \times 0,22 = 2 \times a$$

$$a = 208,48$$

$$\text{Carbono: } 1 \times 81,86 + 2 \times 11,61 + 3 \times 1,92 + 4 \times 0,23 + 4 \times 0,22 + 1 \times 3,18 = b$$

$$b = 115,82$$

Se considera ahora que no hay exceso de aire ($c=0$) para obtener el aire estequiométrico X, ya que esta es obviamente independiente del exceso de aire introducido, al igual que los moles de hidrógeno y de carbono en los productos (a y b , respectivamente):

$$\text{Oxígeno: } 2 \times 3,18 + 2 \times X = a + 2 \times b$$

$$X = 216,88$$

Ahora se repite pero teniendo en cuenta el exceso, por lo que aparece c :

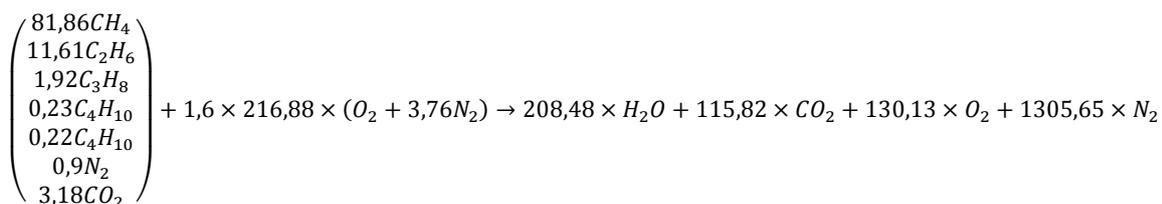
$$\text{Oxígeno: } 2 \times 3,18 + 2 \times 1,6 \times X = a + 2 \times b + 2 \times c$$

$$c = 130,13$$

$$\text{Nitrógeno: } 2 \times 0,9 + 2 \times 1,6 \times X \times 3,76 = 2 \times d$$

$$d = 1305,65$$

De tal manera que la reacción se puede escribir finalmente como sigue:



2.2 COMPOSICIÓN GASES DE COMBUSTIÓN

Se obtiene el porcentaje y fracción molar de cada componente en los gases resultantes de la combustión, ya que estos valores son necesarios para los cálculos que se realizan más adelante.

A partir de lo obtenido en el apartado anterior, se deduce la siguiente tabla:

Composición de los gases de combustión		
Componente	% Volumen	Fracción molar
N ₂	74,18	0,74
H ₂ O	11,84	0,12
O ₂	7,39	0,07
CO ₂	6,58	0,07

Tabla 3.

2.3 TEMPERATURA GASES DE COMBUSTIÓN

Es necesario calcular la temperatura a la que se encuentran los productos de la combustión de cara a la simulación con el software *SolidWorks*.

Con los datos de los apartados anteriores ya se puede calcular la temperatura a la que se encuentran los productos de la combustión. Para ello se recurre a la fórmula que permite el cálculo del calor de combustión en flujo abierto:

$$Q = H_2 - H_1 = \sum_{\text{produc}}^n (\bar{h}_2 - \bar{h}_{ref} + \Delta \bar{h}_{form}) - \sum_{\text{react}}^n (\bar{h}_1 - \bar{h}_{ref} + \Delta \bar{h}_{form})$$

Donde:

- Q es el calor de combustión en kJ/kmol.
- La diferencia entre H_2 y H_1 representa la variación de entalpía del sistema, en kJ/kmol.
- h_2 y h_1 representan las entalpías de cada uno de los reactivos y de cada uno de los productos a la temperatura a la que se encuentran, en kJ/kmol.
- h_{ref} son las entalpías a la temperatura de referencia, que es la temperatura ambiental, a la que se encuentran precisamente los reactivos, en kJ/kmol.
- Δh_{form} son las entalpías de formación, es decir, las variaciones de entalpías cuando se forma un mol del compuesto correspondiente a partir de sus elementos en estado normal. La entalpía de formación de elementos puros es nula. Se expresa en kJ/kmol.

Para la entalpía de cada sustancia se cumple la siguiente relación:

$$h = c_p \times T$$

Dónde:

- c_p es el calor específico de la sustancia en kJ/K kmol.
- T es la temperatura en K.

Esta relación se utiliza para sustituir las h_2 ya que se desconoce la temperatura de los gases de combustión por lo que no se puede conocer su valor:

$$h_2 = c_p \times T_2$$

La temperatura T_2 es la misma para todos los productos. Para obtener dicha temperatura se puede considerar el proceso de combustión adiabático, es decir, se puede considerar que el quemador no intercambia calor con su entorno. De esta manera el calor de combustión es nulo, y la única incógnita es precisamente la temperatura T_2 .

Además, al estar los reactivos a la temperatura de referencia, se considera que h_1 y h_{ref} se anulan.

Los datos que se conocen son los siguientes:

Productos				
Componente	N	C_p (kJ/K kmol)	h_{ref} (kJ/kmol)	Δh_{form} (kJ/kmol)
H ₂ O	208,48	33,65	9904	-241826
CO ₂	115,82	37,17	9364	-393522
O ₂	130,13	29,4	8683	0
N ₂	1305,65	29,07	8670	0

Tabla 4.

Reactivos		
Componente	N	Δh_{form} (kJ/kmol)
CH ₄	81,86	-74873
C ₂ H ₆	11,61	-83851
C ₃ H ₈	1,92	-104673
C ₄ H ₁₀	0,23	-125652
C ₄ H ₁₀	0,22	-125652
N ₂	0,9	0
CO ₂	3,18	-393522
O ₂	347	0
N ₂	1304,75	0

Tabla 5.

Sustituyendo todos estos datos en la fórmula anterior se llega a la siguiente ecuación:

$$0 = 53101,45 \times T_2 - 102981301,8$$

$$T_2 = 1939,33K$$

Esta es la temperatura a la que salen los gases tras la combustión.

2.4 FLUJO MÁSIICO DE LOS QUEMADORES

Para la simulación por ordenador se hace necesario no solo conocer la temperatura de los gases de combustión, sino también el flujo másico que entra a la cámara de combustión.

No existe una manera de determinar el flujo necesario para calentar el horno a la temperatura deseada, por lo que es necesario realizar una aproximación inicial que posteriormente se comprobará y se corregirá si fuera necesario mediante simulación. Por lo tanto, se considera que para ambas cámaras se utilizan quemadores de 20 kW de potencia máxima. Partiendo de este dato, se puede calcular el flujo másico de gas natural que requiere cada uno de los quemadores con la siguiente fórmula:

$$Pot = \dot{m} \times PCI$$

Dónde:

- Pot es la potencia en kW.
- \dot{m} es el flujo másico en kg/s.
- PCI es el poder calorífico inferior del combustible, en kJ/kg.

El poder calorífico representa la cantidad de energía que se puede desprender en una reacción de oxidación, referida a la unidad de masa del combustible. El poder calorífico inferior no considera la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua que se genera en la combustión, y por eso es el que interesa para realizar los cálculos del horno, ya que los gases en su interior están a temperaturas elevadas por lo que el agua no llega a condensarse.

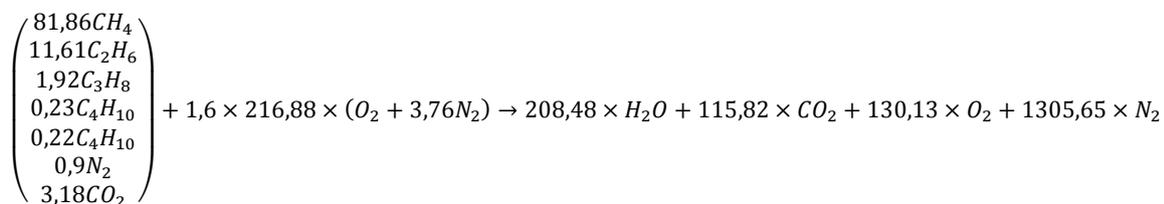
Se toma el siguiente valor típico del PCI del gas natural:

$$PCI = 39900 \text{ kJ/kg}$$

Utilizando la fórmula anterior se deduce que el flujo másico de gas natural que entra a cada uno de los quemadores es:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{Pot}{PCI} = \frac{20}{39900} = 0,0005 \frac{kg}{s}$$

Como se quiere obtener el flujo másico de gases de combustión que entran al horno, se recurre a la reacción de combustión que se definió en el apartado 2.1:



En la reacción se observa que si se considera, por ejemplo, que entran 100 moles de gas natural; se requieren 1651,76 moles de aire (contando con el exceso establecido del 60%) para que se produzca la combustión.

Se necesita calcular la masa molar del gas natural empleado y del aire para pasar esas cantidades a unidades de masa. Las masas molares de los elementos que son utilizadas son las siguientes:

Elemento	M(g/mol)
C	12
H	1
O	16
N	14

Tabla 6.

Por lo que se tienen los siguientes valores para los distintos compuestos:

$$CH_4 = 16 \text{ g/mol}$$

$$C_2H_6 = 30 \text{ g/mol}$$

$$C_3H_8 = 44 \text{ g/mol}$$

$$C_4H_{10} = 58 \text{ g/mol}$$

$$N_2 = 28 \text{ g/mol}$$

$$CO_2 = 44 \text{ g/mol}$$

$$O_2 = 32 \text{ g/mol}$$

La masa molar promedio del gas natural empleado es:

$$\bar{M}_{gas} = \frac{1}{100} \times (16 \times 81,86 + 30 \times 11,61 + 44 \times 1,92 + 58 \times 0,45 + 28 \times 0,9 + 44 \times 3,18) = 18,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 18,07 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Mientras que la del aire es:

$$\bar{M}_{aire} = \frac{1}{4,75} \times (1 \times 32 + 3,76 \times 28) = 28,9 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

A partir de estos datos se deduce que 100 moles de gas natural son unos 1807 g y que 1651,76 moles de aire son unos 47735,81 g. Por lo que 1,81 kg de gas natural requieren 47,74 kg de aire.

Una sencilla regla de tres permite obtener el flujo másico de aire requerido:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{0,0005 \times 47,74}{1,81} = 0,013 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El flujo másico que sale de cada uno de los quemadores y entra al horno será la suma del flujo de gas natural y del flujo de aire que entra a los mismos, ya que la masa de los productos debe ser igual a la de los reactivos, por lo que se tiene:

$$\dot{m} = 0,013 + 0,0005 = 0,0135 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

2.5 PROPIEDADES GASES DE COMBUSTIÓN

Finalmente, se han de calcular las propiedades de los gases de combustión, ya que en la simulación no se va a definir la mezcla de los mismos sino un gas cuyas propiedades sean equivalentes, de tal manera que los resultados que se obtengan se puedan extrapolar a la situación real.

Las propiedades que se han de calcular son:

- El calor específico.
- La conductividad térmica.
- La viscosidad dinámica.

- La masa molar.
- El coeficiente de dilatación adiabática.

Al ser todos los fluidos que intervienen gases, se supone para ellos un comportamiento de gases ideales.

El calor específico interesa aquí en las unidades de J/kg K. Como es un valor que depende de la temperatura, recurriremos a las tablas que nos proporciona el propio programa *SolidWorks* para cada uno de los componentes de los gases de combustión. Se utilizan estos datos y la siguiente fórmula para calcular el calor específico promedio para diferentes temperaturas:

$$\bar{c}_p = \sum x_i \times c_{pi}$$

Dónde:

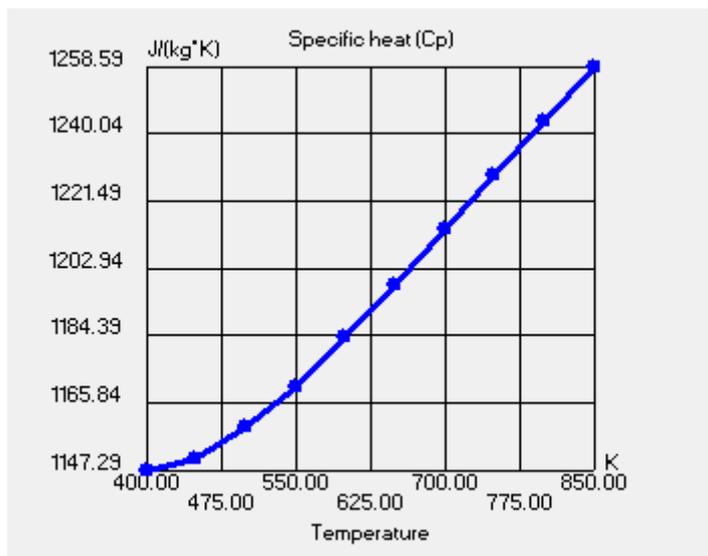
- x_i son las fracciones molares de los componentes de los gases de combustión, que se toman del apartado 2.2.
- c_{pi} son los calores específicos de los componentes de los gases de combustión, que se toman de la base de datos de *SolidWorks*.

Se aplica esta ecuación para distintas temperaturas, empleando los datos que siguen:

Temperatura (K)	Calor específico (J/(kg.K))			
	Nitrógeno	Oxígeno	Dióxido de carbono	Vapor de agua
400	1045	942,47	947,73	2014
450	1050	957,67	983,715	1980
500	1056	972,87	1019,7	1985
550	1065	987,69	1048,05	1997
600	1075	1002,5	1076,4	2026
650	1086	1015,9	1099,95	2056
700	1098	1029,3	1123,5	2085
750	1110	1041,1	1143,7	2119
800	1122	1052,9	1163,9	2152
850	1134	1063	1181,4	2186

Se obtienen los siguientes resultados con la ayuda de una hoja de cálculo:

Temperature	Specific heat (Cp)
400 K	1147.29 J/(kg*K)
450 K	1150.5 J/(kg*K)
500 K	1159.12 J/(kg*K)
550 K	1170.24 J/(kg*K)
600 K	1184.14 J/(kg*K)
650 K	1198.47 J/(kg*K)
700 K	1213.42 J/(kg*K)
750 K	1228.62 J/(kg*K)
800 K	1243.7 J/(kg*K)
850 K	1258.59 J/(kg*K)



A continuación se opera de la misma manera para obtener los valores de la conductividad térmica en función de la temperatura:

$$\bar{k} = \sum x_i \times k_i$$

Donde:

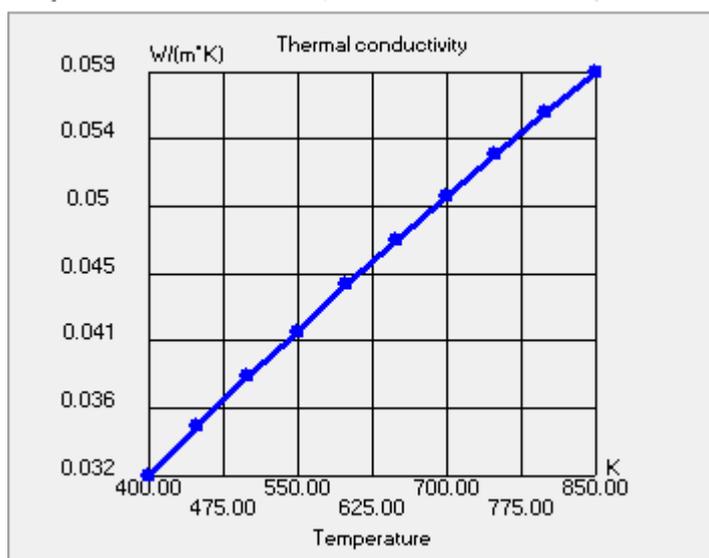
- x_i son de nuevo las fracciones molares de los componentes de los gases de combustión.
- k_i son las conductividades térmicas de los componentes de los gases de combustión, que se toman de la base de datos de *SolidWorks*.

Los datos de los que se parte son los siguientes:

Temperatura (K)	Conductividad térmica (W/m.K)			
	Nitrógeno	Oxígeno	Dióxido de carbono	Vapor de agua
400	0,0327	0,03471	0,026152	0,0261
450	0,0358	0,038319	0,02997	0,0299
500	0,0389	0,041928	0,033788	0,0339
550	0,0417	0,045404	0,037449	0,0379
600	0,0446	0,04888	0,04111	0,0422
650	0,0472	0,052221	0,0446455	0,0464
700	0,0499	0,055562	0,048181	0,0505
750	0,0524	0,0587725	0,0516005	0,0549
800	0,0548	0,061983	0,05502	0,0592
850	0,0572	0,0650685	0,058326	0,0637

Los resultados que se obtienen con una hoja de cálculo son los siguientes:

Temperature	Thermal conductivity
400 K	0.0315903 W/(m*K)
450 K	0.0348602 W/(m*K)
500 K	0.0381541 W/(m*K)
550 K	0.0412057 W/(m*K)
600 K	0.0443673 W/(m*K)
650 K	0.0472767 W/(m*K)
700 K	0.050248 W/(m*K)
750 K	0.0530901 W/(m*K)
800 K	0.0558462 W/(m*K)
850 K	0.0586096 W/(m*K)



El procedimiento es similar para obtener la viscosidad dinámica, con la excepción de que la ecuación utilizada varía de las empleadas anteriormente. En este caso se emplea la conocida como ecuación de Wilke:

$$\bar{\mu} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \times \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \times \Phi_{ij}}$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \times \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \times \left(1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{4}}\right)^2$$

Donde:

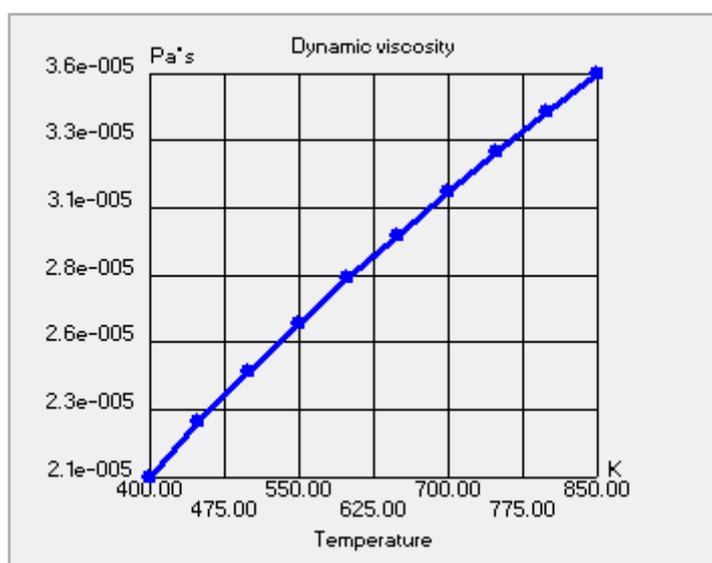
- n es el número de especies químicas en la mezcla.
- x_i y x_j son las fracciones molares de las especies i y j.
- μ_i y μ_j son las viscosidades de las especies i y j para las distintas temperaturas.
- M_i y M_j son los pesos moleculares de i y j.
- Φ_{ij} es un parámetro adimensional, se comprueba que cuando $i=j$, $\Phi_{ij}=1$.

Los datos que se conocen son los siguientes:

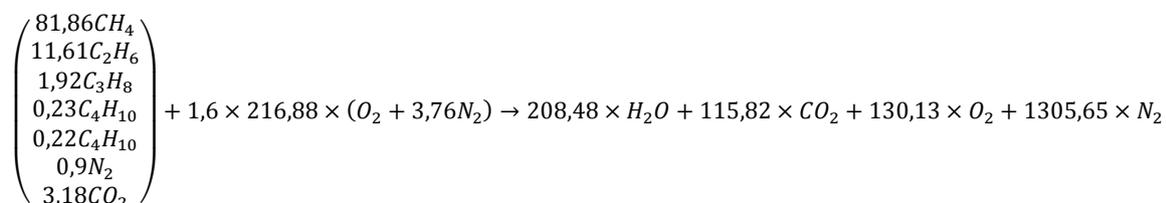
N=4	g/mol	x		
Nitrogeno	28	0,74		
Oxigeno	32	0,07		
Dióxido de carbono	44	0,07		
Vapor de agua	18	0,12		
Gases combustión	Viscosidad (Pa.s)			
Temperatura (K)	Nitrógeno	Oxigeno	Dióxido de carbono	Vapor de agua
400	2,20E-005	2,55E-005	1,96E-005	1,34E-005
450	2,40E-005	2,77E-005	2,16E-005	1,53E-005
500	2,58E-005	2,99E-005	2,36E-005	1,70E-005
550	2,75E-005	3,19E-005	2,55E-005	1,88E-005
600	2,91E-005	3,39E-005	2,73E-005	2,07E-005
650	3,06E-005	3,58E-005	2,90E-005	2,25E-005
700	3,21E-005	3,76E-005	3,07E-005	2,43E-005
750	3,35E-005	3,94E-005	3,23E-005	2,60E-005
800	3,49E-005	4,11E-005	3,39E-005	2,79E-005
850	3,62E-005	4,28E-005	3,54E-005	2,97E-005

Operando la ecuación de Wilke, se llegan a los siguientes resultados:

Temperature	Dynamic viscosity
400 K	2.07142e-005 Pa*s
450 K	2.2733e-005 Pa*s
500 K	2.46042e-005 Pa*s
550 K	2.63848e-005 Pa*s
600 K	2.80888e-005 Pa*s
650 K	2.96993e-005 Pa*s
700 K	3.13017e-005 Pa*s
750 K	3.28134e-005 Pa*s
800 K	3.43263e-005 Pa*s
850 K	3.57583e-005 Pa*s



La siguiente propiedad que se debe calcular es la masa molar promedio, la cual se puede obtener de forma sencilla a partir de las masas molares de cada uno de los componentes, las cuales ya han sido calculadas en este mismo apartado. Recurriendo de nuevo a la reacción química deducida en el apartado 2.1 se obtiene lo siguiente:



$$\bar{M} = \frac{1}{1760,08} \times (18 \times 208,48 + 44 \times 115,82 + 32 \times 130,13 + 28 \times 1305,65) = 28,20 \frac{g}{mol} = 0,0282 \frac{kg}{mol}$$

Luego ya se conoce la masa molar promedio de los gases de combustión. La última propiedad que se necesita conocer es el coeficiente de dilatación

adiabática. Este coeficiente adimensional se define como la relación entre la capacidad calorífica a presión constante y la capacidad calorífica a volumen constante. Pese a que se trata de un valor que varía con la temperatura, el programa *SolidWorks* solo acepta que se introduzca un valor constante, que se suele tomar a la temperatura ambiente. La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$\gamma = \sum x_i \times \gamma_i$$

Dónde:

- x_i son de nuevo las fracciones molares.
- γ_i son los coeficientes de dilatación adiabática de cada uno de los componentes de los gases de combustión.

Los valores de los coeficientes a temperatura ambiente, tomados del propio programa, son:

	γ
Nitrógeno	1,399
Oxígeno	1,395
Dióxido de carbono	1,287
Vapor de agua	1,330

Tabla 7.

Luego el coeficiente de dilatación adiabática de la mezcla vale:

$$\gamma = 1,399 \times 0,74 + 1,395 \times 0,07 + 1,287 \times 0,07 + 1,330 \times 0,12 = 1,383$$

Con este último dato ya se dispone de todos los datos necesarios para la simulación del fluido que circula por el horno.

3 CÁLCULOS DEL ESPESOR DE LAS PAREDES DEL HORNO

Para determinar que materiales refractarios se van a emplear, así como el grosor de los mismos, se parte del supuesto más desfavorable, que es que los gases del interior de las cámaras se encuentren a la máxima temperatura operativa, que es de 1100°C.

Se trata de un problema de conducción, convección y radiación de calor mono dimensional en régimen permanente. Además, dadas las grandes dimensiones del horno en comparación con su espesor, se pueden considerar sus paredes como simples placas planas.

Se procede en primer lugar hallando los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación tanto para el exterior como para el interior del horno partiendo de una suposición. Se calculan entonces los flujos de calor a través de la pared y se comprueban que estos coincidan. De no ser así, se procede a iterar hasta que se dé la convergencia.

Los datos que se conocen son los siguientes:

- $T_{\text{sup.ext}}$ es la temperatura de la superficie externa del aislante refractario. Según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, toda superficie que esté expuesta a contactos accidentales debe estar siempre a temperaturas inferiores a 60°C (333 K), por lo que ese es el valor que se usa para la superficie externa.
- T_{ext} es la temperatura de los gases en el exterior del horno. Se estima en una temperatura ambiente de 20°C (293 K).
- T_{inte} es la temperatura de los gases en el interior del horno. Al considerarse el caso más desfavorable, es de 1100°C (1373 K).

Las incógnitas que desconocemos a priori son las siguientes:

- $T_{\text{sup.inte}}$ es la temperatura de la superficie interna del muro de ladrillo refractario.

- $h_{\text{conv rad,ext}}$ es la suma de los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación de los gases en el exterior del horno en $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- $h_{\text{conv rad, inte}}$ es la suma de los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación de los gases en el interior del horno en $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- esp_i es el espesor de cada una de las capas de los muros del horno en m.
- k_i es la conductividad térmica de cada material del muro en $W/m \text{ K}$.

3.1 CÁLCULO DEL COEFICIENTE $h_{\text{conv rad,ext}}$

El coeficiente $h_{\text{conv rad,ext}}$ se obtiene como la suma de $h_{\text{conv,ext}}$ más $h_{\text{rad,ext}}$.

El fluido en el exterior es aire, siendo la convección natural. Por eso se estima:

$$h_{\text{conv, ext}} = 7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Para obtener $h_{\text{rad,ext}}$ se recurre a la ley de Stefan-Boltzmann. Dicha ley establece que la energía radiada por segundo y por unidad de superficie por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma \times T^4$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Para obtener la potencia emisiva de una superficie real (que es menor que la de un cuerpo negro) se recurre a la emisividad ε , que es una propiedad que varía desde 0 hasta 1 dependiendo del tipo de material que compone la superficie, su acabado, su temperatura y la longitud de onda. La fórmula de la potencia queda entonces:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T^4$$

Si la superficie está además radiando energía hacia un entorno que se encuentra a una temperatura inferior, se tiene:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times (T_{sup.ext}^4 - T_{ext}^4)$$

Como se sabe que:

$$h_{convrad.ext} = h_{rad.ext} + h_{conv.ext}$$

Se puede obtener la parte del calor transferido por radiación:

$$E = h_{rad.ext} \times (T_{sup.ext} - T_{ext})$$

Se igualan ambas fórmulas:

$$\varepsilon \times \sigma \times (T_{sup.ext}^4 - T_{ext}^4) = h_{rad.ext} \times (T_{sup.ext} - T_{ext})$$

Se necesita conocer el valor de la emisividad. Para la radiación exterior, al estar el horno rodeado de un gas no radiante como es el aire, en el que el porcentaje de especies radiantes no es significativo, el valor de la emisividad se obtiene directamente de las características del material de la capa más externa del muro, que es acero. Se toma un valor de $\varepsilon_a = 0,7$ tal y como aparece indicado en la tabla 4.1 del capítulo 4 del libro *Fundamentos de Electro-Óptica* para ingenieros de Glenn D. Boreman. Su conductividad es de $15 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$.

Se calcula el valor de $h_{rad,ext}$ despejándola de la expresión anterior:

$$h_{rad,ext} = \varepsilon_a \times \sigma \times \frac{(T_{sup.ext}^4 - T_{ext}^4)}{(T_{sup.ext} - T_{ext})}$$

$$h_{rad,ext} = 0,7 \times 5,67^{-8} \times \frac{(333^4 - 293^4)}{(333 - 293)} = 4,889 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se obtiene $h_{conv rad,ext}$ sumando ambos términos:

$$h_{conv rad,ext} = h_{conv,ext} + h_{rad,ext}$$

$$h_{conv rad,ext} = 7 + 4,889 = 11,889 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.2 CÁLCULO DEL COEFICIENTE $h_{conv rad,inte}$

El coeficiente $h_{conv rad,inte}$ se obtiene como la suma de $h_{conv,inte}$ más $h_{rad,inte}$.

El valor de $h_{conv,inte}$ se aproxima a un valor de $40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cuando se haga la simulación más adelante, se comprobará este punto.

Para obtener $h_{\text{rad, inte}}$ se procede igual que en el anterior punto:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T^4$$

Se necesita conocer el valor de la emisividad del gas ε , para lo que se recurre al método de Hottel, según el cual en situaciones en las que el vapor de agua y el dióxido de carbono aparecen con otros gases no radiantes (por ejemplo el oxígeno) en una mezcla, la emisividad del gas se puede expresar como:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta\varepsilon$$

Dónde:

- ε_w es la emisividad del vapor de agua en una mezcla con gases no radiantes.
- ε_c es la emisividad del dióxido de carbono en una mezcla con gases no radiantes.
- $\Delta\varepsilon$ es un factor de corrección asociado con mezclas de vapor de agua y dióxido de carbono.

Para obtener estas emisividades y el factor de corrección se necesita conocer la temperatura del gas y las presiones parciales de las especies radiantes.

La temperatura del gas en el caso más desfavorable es de 1100°C. Para obtener las presiones parciales es necesario recurrir a la composición de los gases de combustión, la cual se detalla en la Tabla 3, apartado 2.2 del presente documento.

La presión parcial se calcula multiplicando la fracción molar correspondiente por la presión total de la mezcla:

$$P_i = X_i \times P$$

Dónde:

- P_i es la presión parcial correspondiente al componente i .
- X_i es la fracción molar del componente i .

- P es la presión total, que es igual a 1 atm.

Ya que las temperaturas son elevadas, el comportamiento de los gases se puede suponer como ideal, y la fracción molar se puede sustituir por el porcentaje en volumen. Se demuestra fácilmente que ambos términos son equivalentes si se recurre a la ley de los gases ideales. Por lo tanto usando los datos de la Tabla 3 podemos obtener las presiones parciales de las especies radiantes:

$$P_w = X_w \times P = 0,12 \times 1 = 0,12 \text{ atm}$$

$$P_c = X_c \times P = 0,07 \times 1 = 0,07 \text{ atm}$$

Se utilizan ahora unas tablas que aparecen en el libro "Transmisión del calor" de V. Ishachenko, V. Osipova y A. Sukomel que permiten obtener las emisividades deseadas en función de las presiones parciales y de un factor L_e que depende de la geometría. Dicho factor L_e se define para casos de formas arbitrarias de volumen V como:

$$L_e = 3,6 \times \left(\frac{V}{A}\right)$$

Donde A es la superficie radiada. En nuestro caso, V será el volumen que ocupan los gases radiantes, es decir, el volumen de la cámara principal donde tiene lugar la combustión. A será el área de las paredes de la cámara principal. Se usan los datos que aparecen en el apartado 1.1 del presente documento:

$$V = 2,4305 \text{ m}^3$$

$$A = 11,1832 \text{ m}^2$$

Luego L_e es:

$$L_e = 3,6 \times \left(\frac{2,4305}{11,1832}\right) = 0,7824 \text{ m} = 2,5669 \text{ pies}$$

Se utilizan ahora las tablas antes mencionadas. La primera permite obtener el valor de ϵ_w :

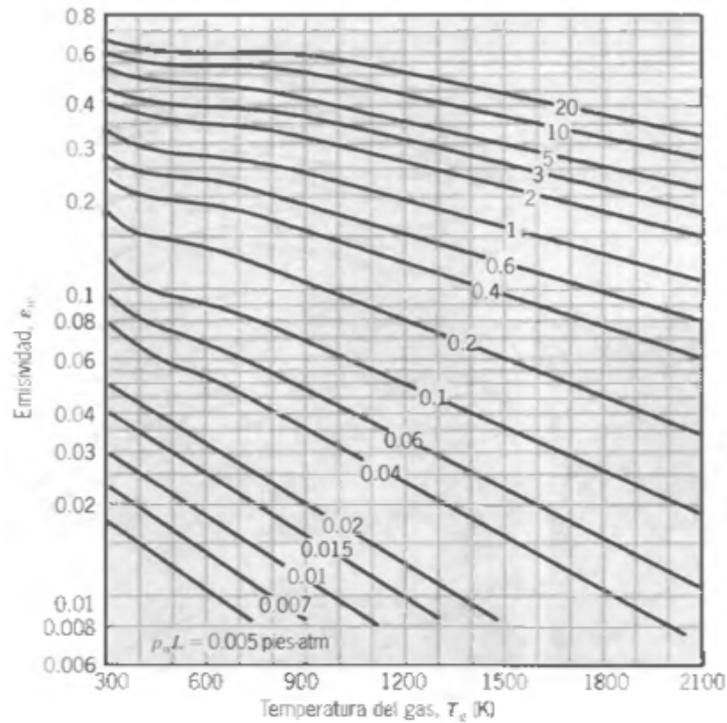


Figura 1: Emisividad de vapor de agua en una mezcla con gases no radiantes a la presión de 1atm. Fuente: "Transmisión del calor" de V. Ishachenko, V. Osipova & A. Sukomel.

Se usan los siguientes datos:

$$T_g = 1373 \text{ K}$$

$$p_w \times L = 0,12 \times 2,5669 = 0,308 \text{ pies} \times \text{atm}$$

Se entra en la figura 1 y se obtiene:

$$\varepsilon_w = 0,09$$

Se procede de la misma manera con la segunda tabla:

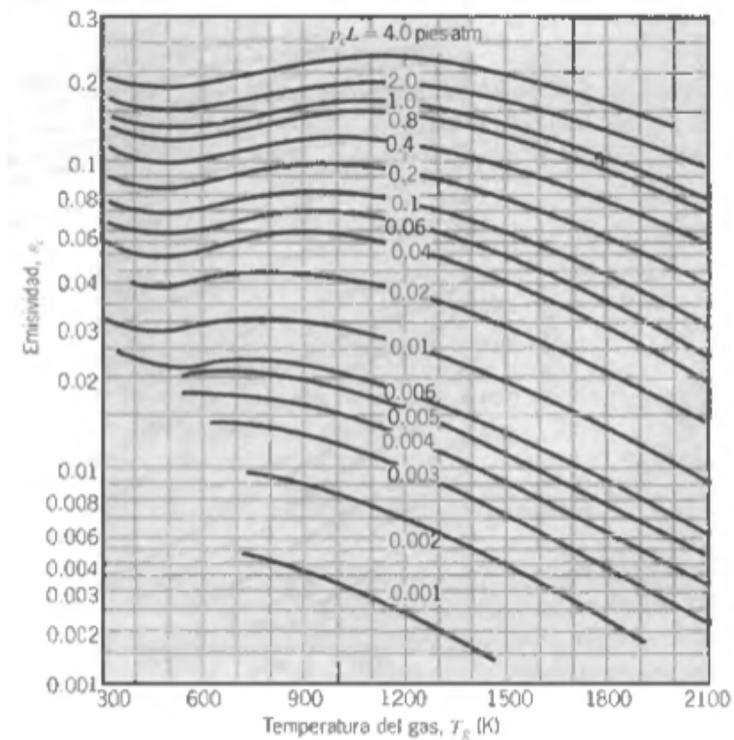


Figura 2: Emisividad de dióxido de carbono en una mezcla con gases no radiantes a la presión de 1atm. Fuente: "Transmisión del calor" de V. Ishachenko, V. Osipova & A. Sukomel.

Se tiene:

$$T_g = 1373 \text{ K}$$

$$p_c \times L = 0,07 \times 2,5669 = 0,179 \text{ pies} \times \text{atm}$$

Luego se obtiene de la figura 2:

$$\epsilon_c = 0,08$$

Finalmente, se recurre a la siguiente tabla para obtener la corrección de mezcla $\Delta\epsilon$:

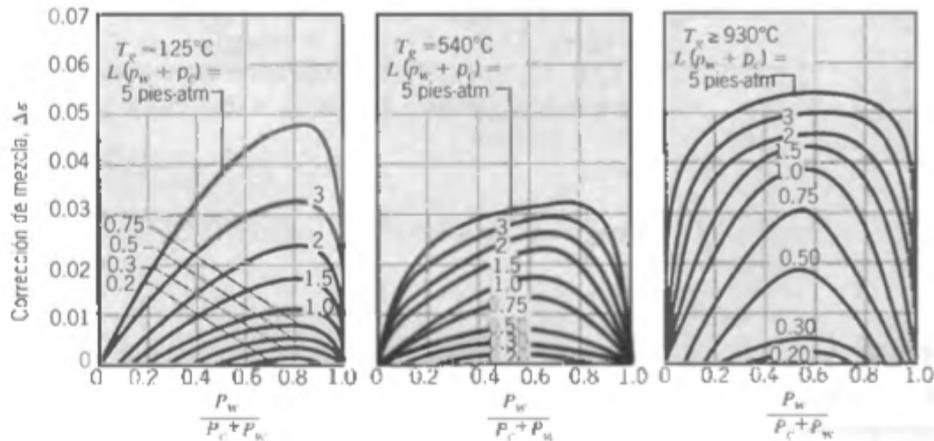


Figura 3: factor de corrección asociado. Fuente: "Transmisión del calor" de V. Ishachenko, V. Osipova & A. Sukomel.

Se entra con los siguientes datos:

$$T_g \geq 930^\circ C$$

$$L \times (p_w + p_c) = 2,5669 \times (0,12 + 0,07) = 0,488 \text{ pies} \times \text{atm}$$

$$\frac{p_w}{p_c + p_w} = \frac{0,12}{0,12 + 0,07} = 0,632$$

Se obtiene:

$$\Delta \varepsilon = 0,017$$

Ya se puede obtener ε_g :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta \varepsilon = 0,09 + 0,08 - 0,017 = 0,153$$

Para obtener $h_{rad,inte}$ se procede igual que antes:

$$\varepsilon \times \sigma \times (T_{inte}^4 - T_{sup.inte}^4) = h_{rad,inte} \times (T_{inte} - T_{sup.inte})$$

$$h_{rad,inte} = \varepsilon_g \times \sigma \times \frac{(T_{inte}^4 - T_{sup.inte}^4)}{(T_{inte} - T_{sup.inte})}$$

Se necesita suponer una temperatura del interior de las paredes. Una vez obtenidos los flujos de calor, se procede a igualar los mismos para comprobar que son iguales y para corregir la temperatura supuesta en caso de que sea necesario. Se supone en un primer momento que:

$$T_{sup.inte} = 800^{\circ}\text{C} = 1073 \text{ K}$$

Luego:

$$h_{rad,inte} = 0,153 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{(1373^4 - 1073^4)}{(1373 - 1073)} = 64,431 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se obtiene $h_{conv rad,inte}$ sumando ambos términos:

$$h_{conv rad,inte} = h_{conv,inte} + h_{rad,inte}$$

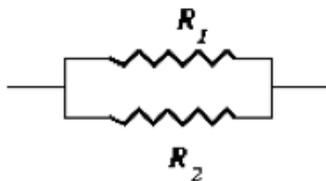
$$h_{conv rad,inte} = 40 + 64,431 = 104,431 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

3.3 CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED EXTERNA

Ya se tiene el coeficiente $h_{conv rad,ext}$ luego ya se puede calcular el calor transferido desde la pared exterior hacia el medio que la rodea. A partir de la analogía eléctrica de la transferencia de calor, que se explica en el apartado 12.4 del documento Memoria, se sabe que el calor por unidad de tiempo y superficie es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{sup.ext} - T_{ext}}{R_T}$$

Donde R_T representa la resistencia térmica. En este caso, el circuito equivalente consiste en dos resistencias en paralelo, al ser la transferencia de calor por dos modos distintos: convección y radiación, siendo representado cada uno de los modos por una resistencia. El circuito queda pues así:



$$R_1 = \frac{1}{h_{conv,ext}}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{rad,ext}}$$

Debido a la disposición en paralelo, la resistencia total del circuito es:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = h_{conv.ext} + h_{rad.ext}$$

Si se simplifica:

$$R_T = \frac{1}{h_{conv.ext} + h_{rad.ext}} = \frac{1}{h_{convrad,ext}}$$

$$R_T = \frac{1}{11,889} = 0,084 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Luego el calor es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{60 - 20}{0,084} = 476,19 \text{ W/m}^2$$

3.4 CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE LA PARED INTERNA

A partir de $h_{conv\ rad, inte}$ se puede calcular el flujo de calor transferido desde el gas caliente del interior del horno hacia la cara interior de la pared por convección y radiación. El procedimiento es análogo al del apartado anterior:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{inte} - T_{sup.inte}}{R_T}$$

La resistencia térmica es de nuevo la asociación en paralelo de las resistencias térmicas (una de convección y la otra de radiación), por lo que se tiene:

$$R_T = \frac{1}{h_{conv.inte} + h_{rad.inte}} = \frac{1}{h_{convrad,inte}}$$

$$R_T = \frac{1}{104,431} = 9,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Luego el calor es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{1100 - 800}{9,58 \times 10^{-3}} = 31315,24 \text{ W/m}^2$$

3.5 CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA PARED INTERIOR DEL HORNO

El valor del flujo de calor ha de ser el mismo en todo el sistema. Es decir, el calor que se transfiere desde muro exterior hacia el ambiente ha de ser igual al calor que se transfiere del gas caliente del interior de la cámara a la pared interna. De la misma manera, el calor por conducción a través del muro ha de tomar también ese valor.

Así, los dos calores calculados anteriormente deberían ser iguales. Si los comparamos se observa que esto no es así:

$$\frac{Q}{A} = 476,19 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{Q}{A} = 31315,24 \text{ W/m}^2$$

La falta de igualdad obliga a repetir el proceso cambiando la temperatura de partida considerada, hasta alcanzar una convergencia aceptable de los resultados. Como la diferencia es elevada, se escoge ahora un valor de temperatura de la cara interior de la pared cercano a la temperatura de los gases:

$$T_{sup.inte} = 1090^{\circ}\text{C} = 1363 \text{ K}$$

El coeficiente de radiación para la pared interior cambia:

$$h_{rad,inte} = 0,153 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{1373^4 - 1363^4}{1373 - 1363} = 88,838 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El coeficiente de convección se mantiene constante, por lo que la suma de ambos es:

$$h_{conv rad,inte} = 40 + 88,838 = 128,838 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La nueva resistencia térmica es:

$$R_T = \frac{1}{128,838} = 7,762 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

El flujo de calor a través de la pared interna queda:

$$\frac{Q}{A} = \frac{1100 - 1090}{7,762 \times 10^{-3}} = 1288,328 \text{ W/m}^2$$

Los valores se acercan, pero el error es aún demasiado grande. Se repite todo el proceso una vez más aumentando en unos grados la temperatura supuesta:

$$T_{sup.inte} = 1096^\circ\text{C} = 1369 \text{ K}$$

$$h_{rad,inte} = 0,153 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{1373^4 - 1369^4}{1373 - 1369} = 89,422 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{conv rad,inte} = 40 + 89,422 = 129,422 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_T = \frac{1}{129,422} = 7,727 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{1100 - 1096}{7,727 \times 10^{-3}} = 517,691 \text{ W/m}^2$$

Ahora se puede considerar que hay convergencia puesto que la diferencia existente entre ambos valores queda dentro de una tolerancia aceptable. Así, se considera finalmente una temperatura de la cara interna del muro de unos 1096°C y un flujo de calor a través del muro de $476,19 \text{ W/m}^2$ al ser este valor más aproximado al real que el calculado con la temperatura aproximada.

3.6 CÁLCULOS DEL ESPESOR DE LOS MUROS

Para dimensionar los muros se hace necesario antes trabajar con el flujo de calor por conducción que los atraviesa, para lo cual se procede igual que en los apartados anteriores. Se usa la siguiente fórmula:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{sup.inte} - T_{sup.ext}}{R_T}$$

Ya se conoce el valor del flujo de calor, puesto que este ha de ser el mismo en todo el sistema. Una temperatura aproximada de la superficie interior del muro también se ha hallado en el apartado anterior, luego la única incógnita que queda es la correspondiente a la resistencia térmica. Se despeja su valor para poder dimensionar la pared:

$$R_T = \frac{T_{sup.inte} - T_{sup.ext}}{\frac{Q}{A}}$$

$$R_T = \frac{1096 - 60}{476,19} = 2,176 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

En este caso, la resistencia térmica total es la suma en serie de las resistencias asociadas a cada uno de los tramos de distinto material que conforman el muro:

$$R_T = \Sigma R_i$$

El sumatorio en nuestro caso cuenta con dos sumandos: el correspondiente al muro de ladrillos refractarios y el correspondiente a la capa de material aislante externa. Se debería tener en consideración también el término debido a la placa de acero externa, pero dada la elevada conductividad térmica del acero (en torno a 50 W/m °C) y el pequeño espesor de la placa, este término se desprecia. Por lo que finalmente el circuito queda así:



Dónde:

- $R_1 = esp_1/k_1$ es la resistencia térmica asociada al muro de ladrillos refractarios.
- $R_2 = esp_2/k_2$ es la resistencia térmica asociada a la capa de material aislante.

Se toma una capa formada por paneles microporosos *ISO-AL* como material aislante externo, cuyo espesor y conductividad térmica a la temperatura de trabajo son:

$$esp_2 = 0,09 \text{ m}$$

$$k_2 = 0,04 \text{ W/m K}$$

Luego:

$$R_2 = \frac{0,09}{0,04} = 2,25 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

La resistencia de los ladrillos refractarios ha de ser:

$$R_1 = R_T - R_2 = 2,176 - 2,25 = -0,074 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

El valor negativo indica que la resistencia térmica del aislante es ya suficiente por sí misma para satisfacer la condición de temperatura en el exterior. Sin embargo, es necesario añadir una capa de ladrillo refractario, a fin de que la pared del horno pueda resistir las altas temperaturas sin deformarse ni ser dañado.

Si se selecciona un ladrillo refractario típico de dimensiones 7 cm x 11,5 cm x 22 cm y conductividad $k_1 = 1 \text{ W/m K}$ que se coloca de canto para formar el muro, su resistencia térmica será:

$$R_2 = \frac{0,115}{1} = 0,115 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

El espesor de la pared de material aislante y refractario es :

$$L = 0,09 + 0,115 = 0,205 \text{ m}$$

Si se considera además la placa de acero de espesor 0,01 m; se tiene que el espesor total de la pared es:

$$L_T = 0,205 + 0,01 = 0,215 \text{ m}$$

Se dimensionan pues de esta manera las paredes de la cámara principal para que la temperatura en las caras externas sea como máximo de 60°C. El acabado exterior de paneles de acero reduce aún más la temperatura percibida por los operarios.

3.7 Espesor entre cámaras

Las dimensiones anteriores se refieren al espesor de las paredes que envuelven a las dos cámaras. Sin embargo, dado que la cámara principal está montada encima de la secundaria, hay una pared que ambas comparten en medio. Se deduce que dicha pared no necesita ser dimensionada como las demás, y que las pérdidas de calor a través de la misma no

son motivo de preocupación, por lo cual se dimensionará con una sola capa de ladrillos refractarios colocados de forma que el espesor entre cámaras sea de 0,115 m.

**ANEXO B: CÁLCULOS
DEL CALENTAMIENTO
CON *SOLIDWORKS***

ÍNDICE

1 CALENTAMIENTO DEL HORNO	3
2 INTRODUCCIÓN A <i>SOLIDWORKS</i>	4
2.1 DISEÑO DE LA PIEZA	4
2.2 <i>FLOW SIMULATION</i>	5
3 MODELO INICIAL DEL HORNO	8
3.1 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES	11
4 SIMULACIONES DE PARTIDA DEL HORNO	12
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR	12
4.2 PRIMERA SIMULACIÓN	13
4.2.1 Análisis de temperaturas	14
4.2.2 Análisis de velocidades y presiones	17
4.3 SEGUNDA SIMULACIÓN	19
4.3.1 Análisis de temperaturas	19
4.3.2 Análisis de velocidades y presiones	22
4.4 TERCERA SIMULACIÓN	24
4.4.1 Análisis de temperaturas	25
4.4.2 Análisis de velocidades y presiones	26
4.5 CUARTA SIMULACIÓN	29
4.5.1 Análisis de temperaturas	30
4.5.2 Análisis de velocidades y presiones	31
5 CÁLCULOS DE LA CHIMENEA	34
5.1 SECCIÓN	34
5.2 ALTURA	36
5.3 MATERIALES	37

5.4 ESPESOR	38
6 MODELO INICIAL DE LA CHIMENEA	42
7 SIMULACIONES DE LA CHIMENEA SIN REALIMENTACIÓN.....	44
7.1 PRIMERA SIMULACIÓN	44
7.2 SEGUNDA SIMULACIÓN	47
8 SIMULACIONES DE LA CHIMENEA CON REALIMENTACIÓN	49
9 CÁLCULOS DE LOS VENTILADORES.....	57
9.1 VENTILADOR DE REALIMENTACIÓN	57
9.2 VENTILADOR DE AIRE AMBIENTE	58
9.3 VENTILADORES DE LOS QUEMADORES	59
10 MÉTODOS DE CONTROL.....	61
10.1 CONTROL DE TEMPERATURA.....	61
10.2 CONTROL DE VELOCIDAD	68
11 SIMULACIONES DEL CALENTAMIENTO DEL HORNO	71
11.1 SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO CON CONTROL DE TEMPERATURA	73
11.2 SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO CON CONTROL DE VELOCIDAD.....	77
12 SIMULACIONES DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN.....	83
12.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN CON LOS QUEMADORES ENCENDIDOS	83
12.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN CON LOS QUEMADORES APAGADOS	85

1 CALENTAMIENTO DEL HORNO

En este anexo se va a analizar el proceso de calentamiento del horno, esto es, desde que el horno se enciende partiendo de un estado de reposo a temperatura ambiente hasta que el horno se encuentra a una temperatura óptima para la introducción del ataúd y el comienzo de la cremación.

Se dimensionarán también los quemadores y la chimenea. La ventilación adicional no se emplea durante el proceso de calentamiento, por lo que no se tendrán en cuenta sus flujos de realimentación en un primer momento.

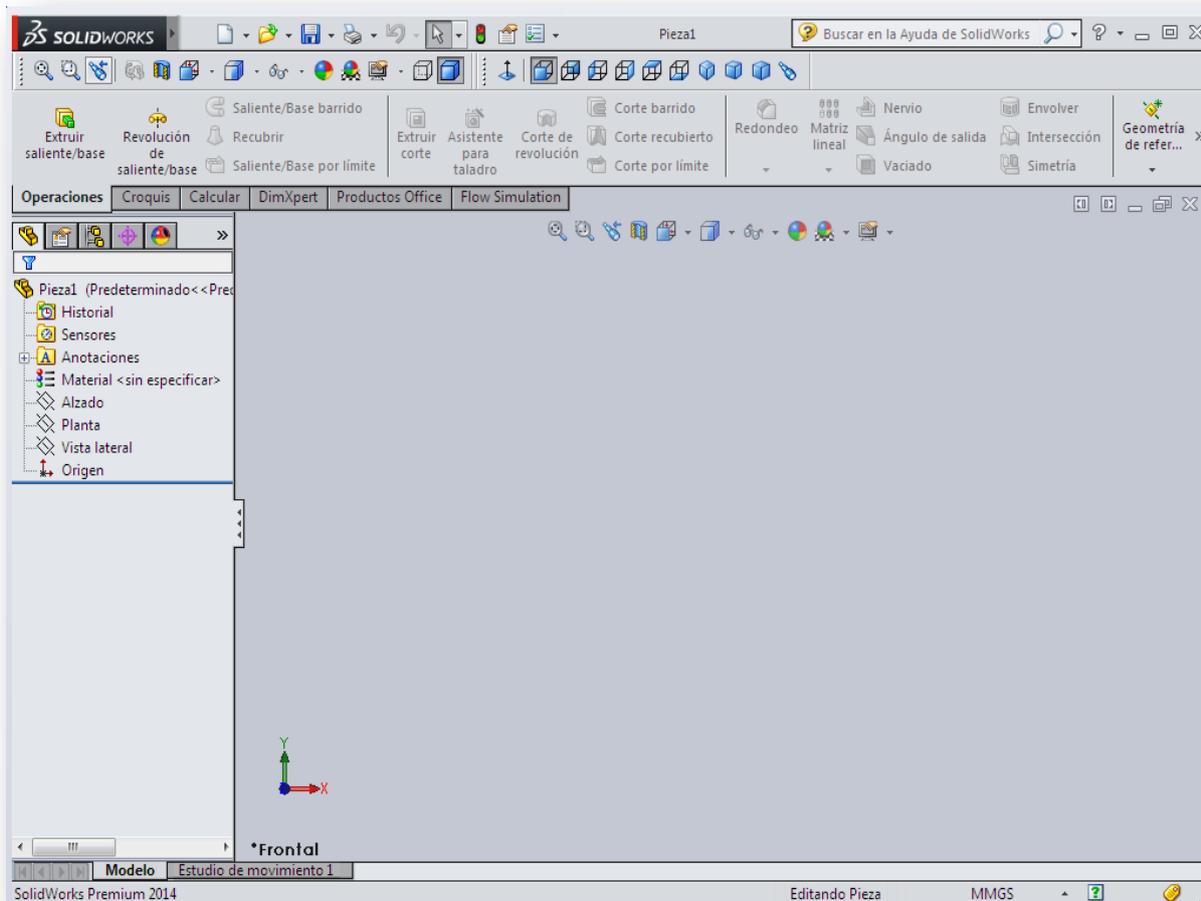
2 INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS

SolidWorks es un software CAD, de diseño asistido por ordenador. Su principal función es el diseño y modelado de piezas y su posterior validación de las cuales se pueden extraer planos técnicos. Además, cuenta con diversos paquetes adicionales que permiten la simulación o el diseño eléctrico, entre otros.

En este proyecto se trabaja con el paquete básico que se utiliza para diseñar un modelo del horno y, posteriormente, se emplea el paquete *Flow Simulation* que permite simular el flujo de los gases y la transferencia de calor en el horno. De esta manera se valida el diseño y se pueden analizar posibles mejoras del modelo para su incorporación.

2.1 DISEÑO DE LA PIEZA

Para el diseño de la pieza se emplean las herramientas estándar que presenta *SolidWorks*, las cuales se asemejan en gran medida a otros programas similares que se pueden encontrar en el mercado.



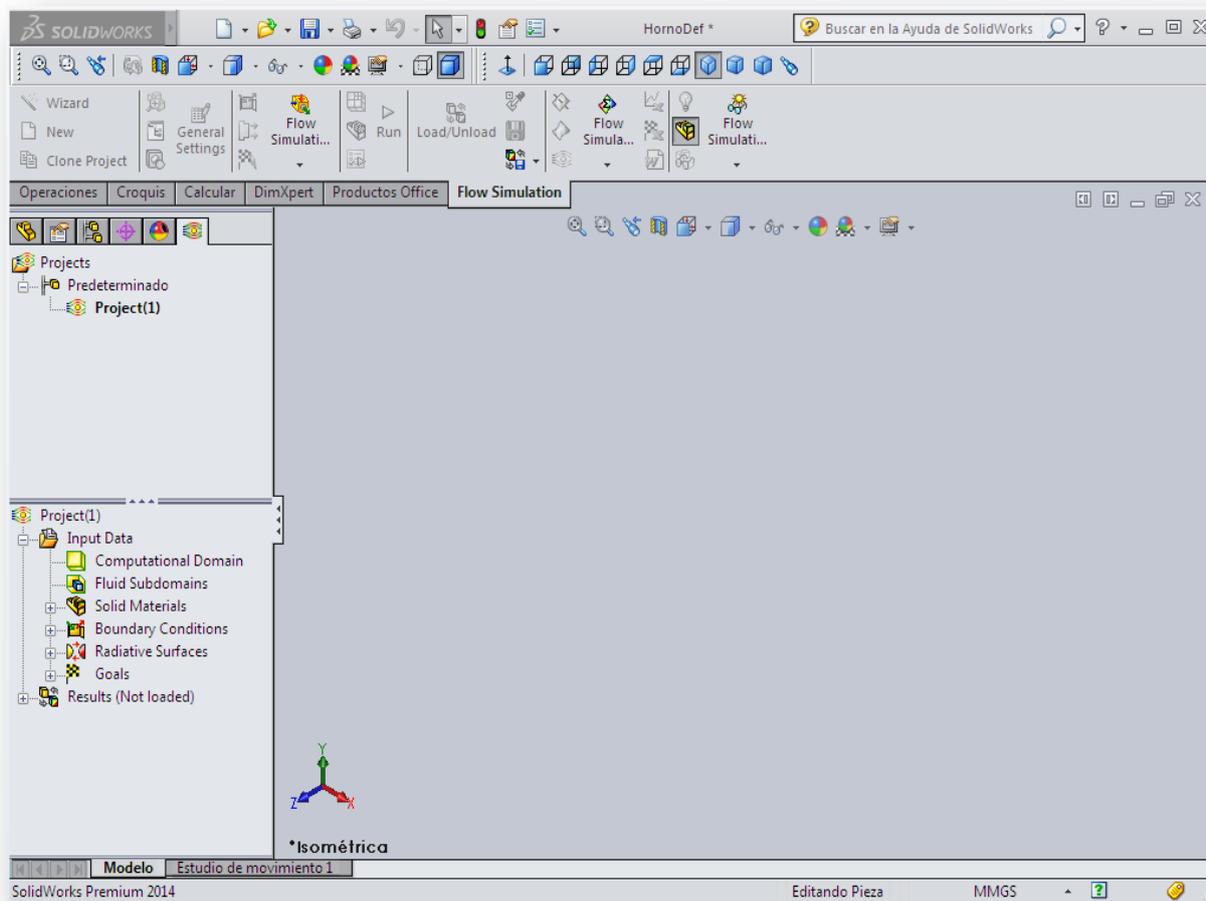
Pantalla inicial de SolidWorks.

Mediante operaciones básicas de extrusión de salientes y de cortes entre otras se pueden diseñar piezas de gran complejidad a partir de croquis dibujados por el usuario. Se permite además la creación de distintos sólidos dentro de una misma pieza, de manera que se puede asignar a cada uno de ellos materiales distintos. Estos materiales pueden ser o bien tomados de la biblioteca digital con la que cuenta el programa o bien creados por el propio usuario, pudiendo así especificar sus propiedades.

2.2 FLOW SIMULATION

Una vez que el diseño de la pieza está completo, se puede utilizar el paquete *Flow Simulation* para llevar a cabo simulaciones realistas en las que se analiza tanto el flujo de los gases como las temperaturas alcanzadas por los mismos o por los cuerpos sólidos. *Flow Simulation* permite el aná-

lisis de la transferencia de calor teniendo en cuenta los tres modos posibles: conducción, convección y radiación.



Pantalla inicial de Flow Simulation.

Para llevar a cabo una simulación se necesita partir de una pieza diseñada con *SolidWorks*. En primer lugar se deben crear las denominadas tapas o *lids*, con la opción *create lids*. Este paso es fundamental para crear unas tapas sólidas que deben cerrar todas las aberturas con las que cuente nuestra pieza, de tal manera que el programa pueda llevar a cabo el análisis posterior considerando una cavidad cerrada a la que entra el flujo por una o varias de estas tapas para posteriormente salir por otra u otras de esas tapas.

A continuación se debe crear un proyecto nuevo y establecer la configuración general (en *General Settings*), donde se define el tipo de análisis (estacionario o transitorio, modos de transferencia de calor a estudiar, etc.) y

los fluidos que se van a utilizar así como su composición en caso de tratarse de una mezcla,

Después, se deben especificar en *Solid Materials* los materiales que componen el horno, así como sus valores de densidad, calor específico y conductividad térmica. Estos valores son utilizados para el análisis de la conducción y la convección en la simulación, y son independientes de los posibles materiales designados en el diseño inicial de la pieza.

En cuanto a la radiación, se deben especificar en *Radiative Surfaces* las superficies que el programa debe considerar junto con sus valores de emisividad.

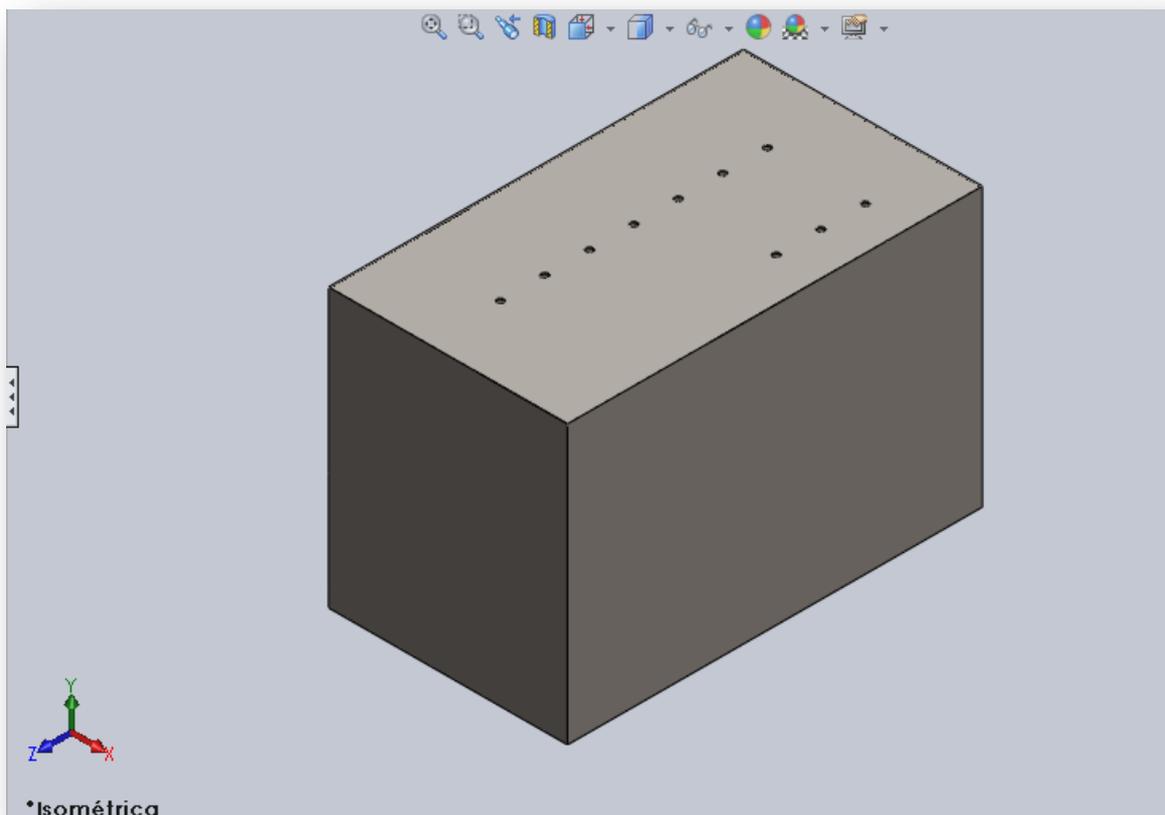
El siguiente paso es definir las condiciones de contorno. Esto se lleva a cabo en la ventana *Boundary Conditions*, en la cual se pueden insertar condiciones de diverso tipo: de flujo (flujo másico o volumétrico de entrada o salida, velocidad de entrada o salida), de presión (presión ambiental u otra especificada) y de pared (ideal o real).

El penúltimo paso consiste en especificar las metas o *Goals*, que pueden ser tanto globales como referidos a una superficie o punto concretos. Estas metas se utilizan para la convergencia y son mostrados al usuario una vez realizada la simulación, por lo que su selección debe ser cuidadosa. Las metas se pueden referir a las temperaturas, velocidades, presiones, etc. de los elementos seleccionados y pueden recoger tanto valores medios como los máximos o mínimos registrados.

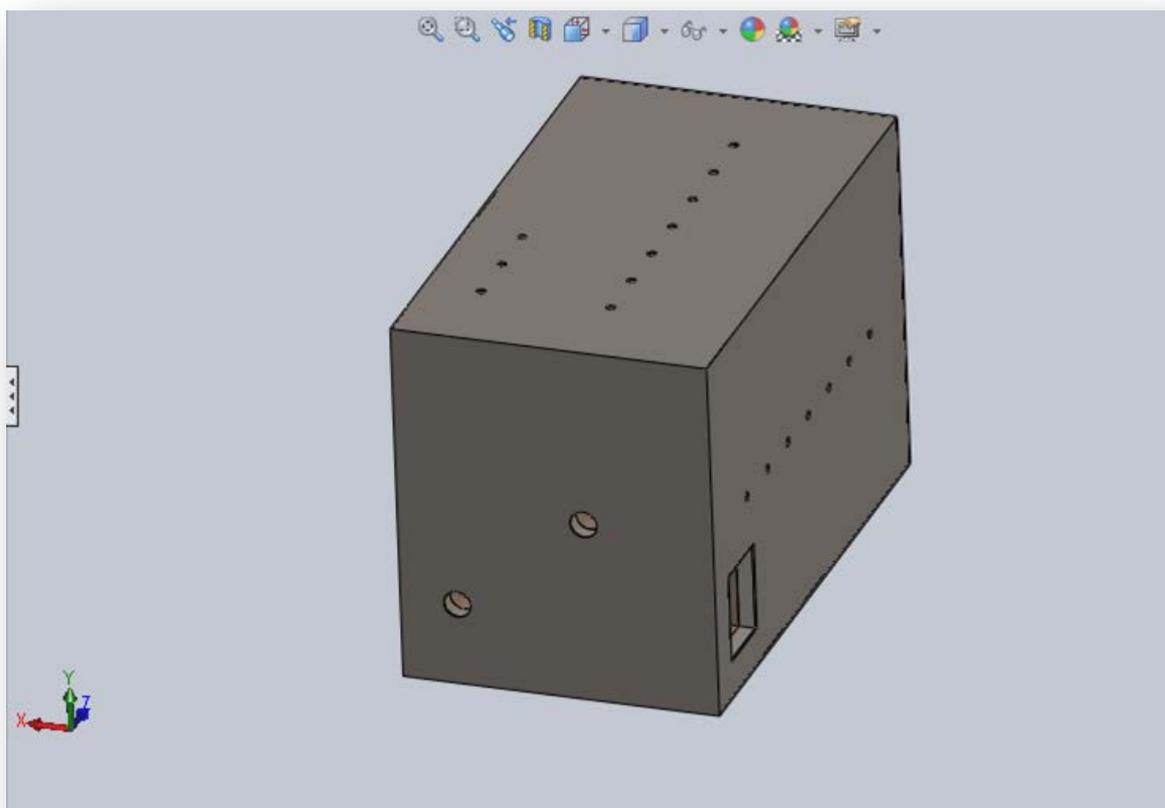
Finalmente, el botón *Run* comienza los cálculos, tras los cuales se puede acceder a la ventana *Results*, que permite crear gráficas de las distintas variables, observar los valores alcanzados por las metas, y mostrar sobre la misma pieza las trayectorias del fluido junto con su temperatura, velocidad o presión.

3 MODELO INICIAL DEL HORNO

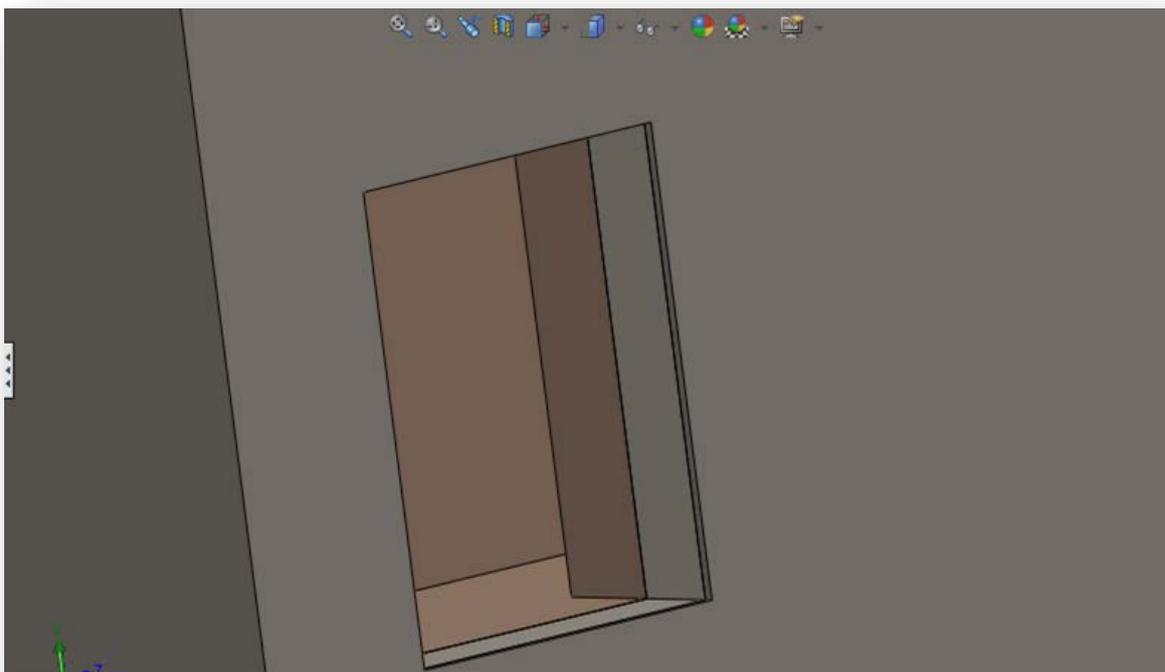
El primer modelo del horno se diseña según las especificaciones detalladas en el Anexo A. Para este primer modelo no se considera la chimenea, sino que en su lugar se practica un orificio de 40 cm de ancho por 50 cm de alto al final del último paso de la cámara secundaria. Siguiendo estas especificaciones se lleva a cabo el modelo inicial:



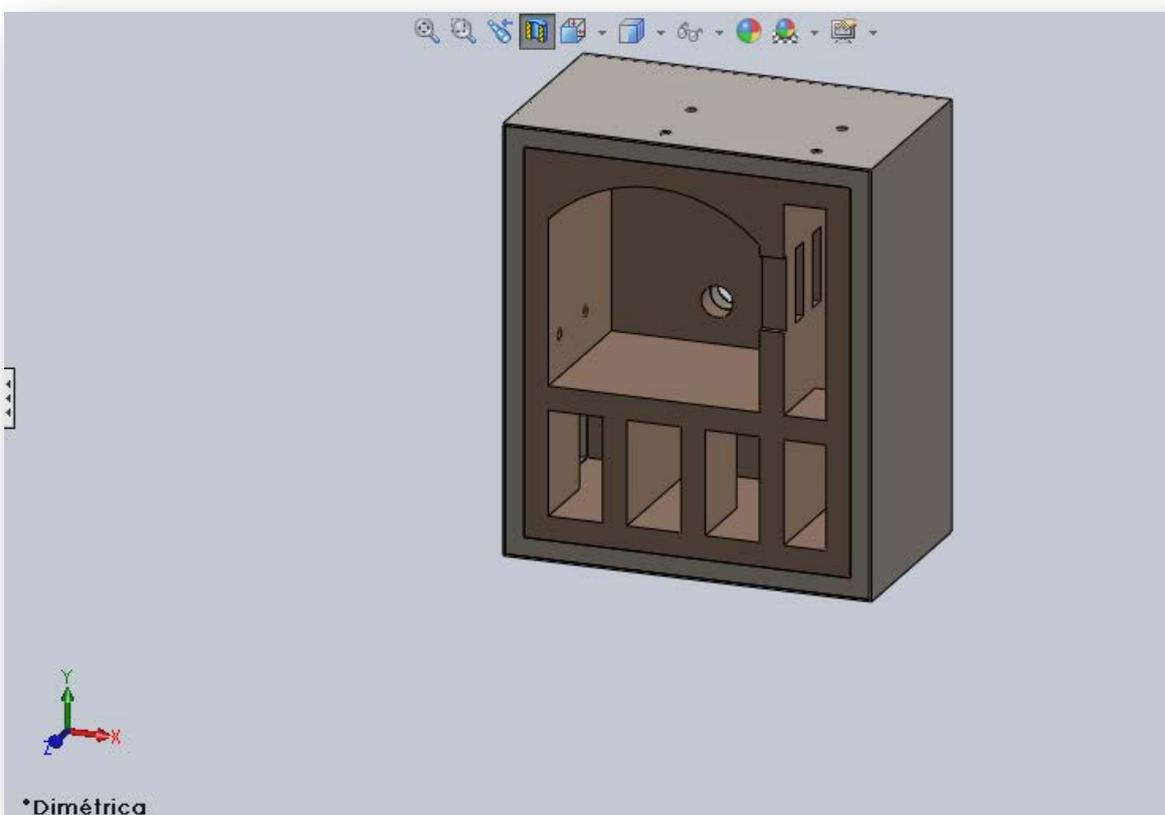
En la siguiente captura se observan los orificios para ambos quemadores situados en la cara posterior, así como el orificio para la chimenea y los orificios de ventilación, tanto los superiores y laterales de la cámara principal como los de la cámara secundaria:



En el siguiente detalle del orificio de la chimenea se aprecian los tres tipos de material que componen la pared del horno (desde el exterior hacia el interior: lámina de acero, aislante ISO-AL y ladrillo refractario):



Corte en el que se aprecia el interior del horno, con la cámara principal abovedada y los pasos de la cámara secundaria:



En las primeras simulaciones se empleará esta pieza sin chimenea, precisamente con el objetivo de obtener suficientes datos de partida para realizar los cálculos de dimensionamiento de la chimenea, que se añadirá entonces a la pieza original.

3.1 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES

Los materiales que se definen para elaborar el modelo inicial así como sus características especificadas son los siguientes:

Material	Conductividad térmica (W/m K)
Ladrillo refractario	1
ISO-AL	0,04
Chapa de acero	52

Tabla 1.

4 SIMULACIONES DE PARTIDA DEL HORNO

En las primeras simulaciones que se llevan a cabo se utiliza el modelo inicial sin chimenea. Además, a la hora de definir los flujos de entrada, solo se definen los de los dos quemadores y no los de la ventilación adicional, ya que esta no se emplea en un principio durante el proceso de calentamiento, y además aún no se conocen las temperaturas a las que salen los gases del horno.

El objetivo de estas simulaciones de partida es comprobar que los quemadores son capaces de proporcionar la potencia suficiente para que se alcance la temperatura de trabajo definida con anterioridad. También se comprueba que la potencia de los quemadores no sea excesiva, lo cual podría provocar un aumento de la temperatura por encima de la temperatura máxima de seguridad que se ha utilizado para dimensionar las paredes del horno, además de provocar también una velocidad excesiva de los gases que impediría que se cumpliera la condición de permanencia en la cámara secundaria. Para comprobar todas estas condiciones resulta más adecuado llevar a cabo en un primer momento análisis estacionarios, en los que poder observar los valores de temperatura, velocidad y presión que se dan en el horno cuando se ha acabado el periodo transitorio.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Al realizar las simulaciones se hace necesario volver a definir los materiales que el programa ha de considerar, así como sus características. Los datos utilizados se recogen en las siguientes tablas:

Materiales para la conducción			
Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad térmica (W/m K)
Ladrillo refractario	2000	1100	1
ISO-AL	300	703	0,04
Capa acero	8000	0,46	50

Tabla 2.

Materiales para la radiación	
Material	Coefficiente de emisividad
Ladrillo refractario	0,75
Capa acero	0,7

Tabla 3.

4.2 PRIMERA SIMULACIÓN

Los pasos a seguir para esta simulación son los siguientes:

- En *General Settings* se selecciona un análisis con conducción, radiación y estacionario. Se definen asimismo los gases que forman la mezcla resultante de la combustión en el quemador, junto con los valores de concentración.
- En la ventana *Solid Materials* se añaden los tres materiales que se van a emplear para esta simulación: ladrillo refractario, aislante ISO-AL y una lámina de acero. Se asigna a cada uno de ellos las superficies correspondientes. Las características de los materiales son las especificadas en la *Tabla 2*.
- En la ventana *Boundary Conditions* se añaden 3 condiciones de contorno: la primera es la condición de presión ambiental en el orificio de la chimenea, y las otras dos son las condiciones de flujo de entrada en los orificios

de ambos quemadores, que se fijarán en 0,0135 kg/s según lo calculado en el apartado 2.4 del Anexo A. Para los flujos de entrada también es necesario especificar la temperatura de los gases de la combustión y su composición a partir de las fracciones molares, lo cual se toma de lo calculado en el apartado 2.3 del Anexo A.

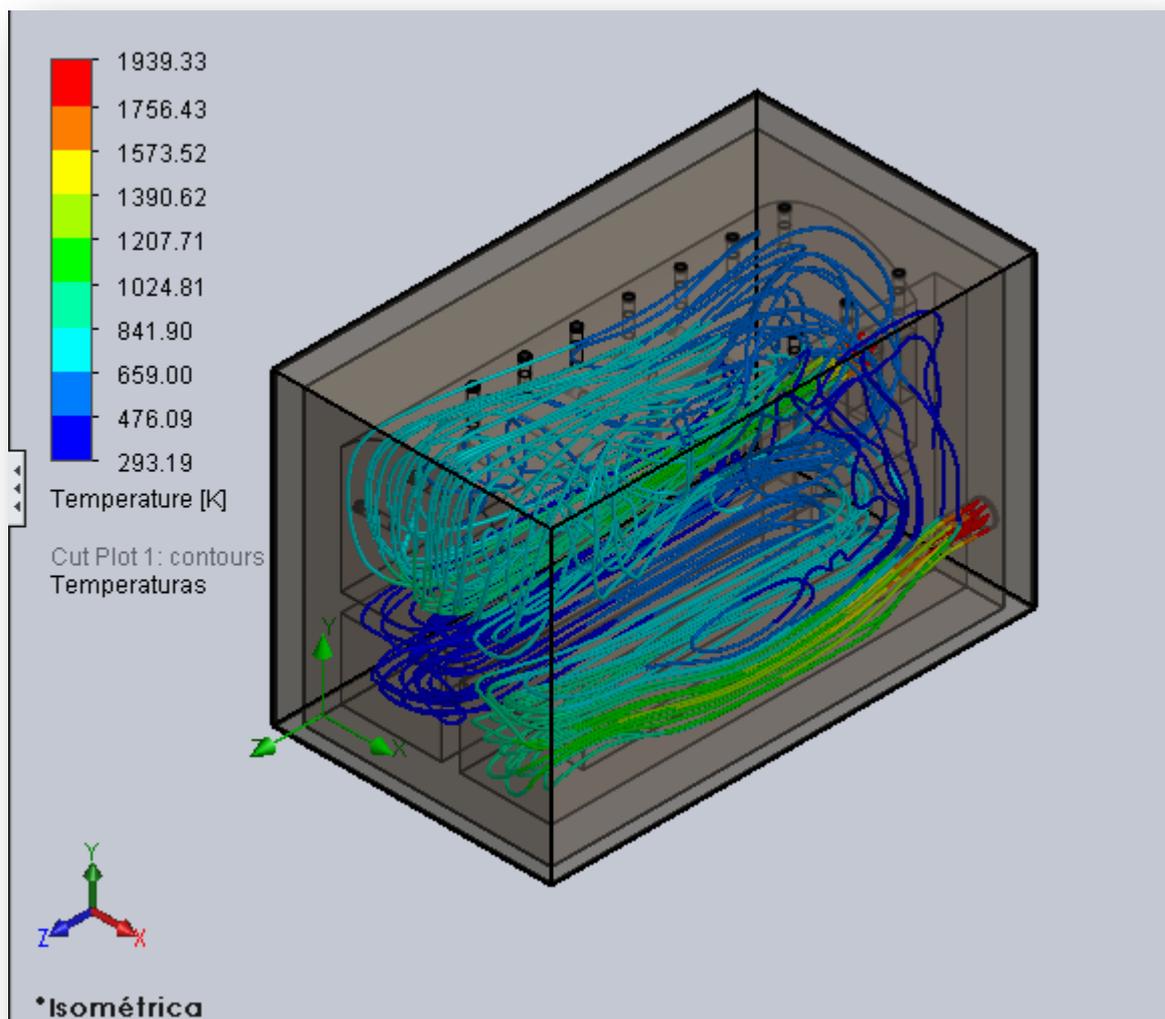
- Para definir las condiciones relativas a la radiación se abre la ventana *Radiative Surfaces*, y se definen dos superficies: la pared interior y la pared exterior del horno, según los datos que aparecen en la *Tabla 3*.

- Finalmente, antes de llevar a cabo la simulación, se fijan las metas o *Goals*: por un lado la temperatura, presión y velocidad del fluido en el orificio de la chimenea a la salida del horno. Se incluyen tanto los valores medios como los máximos y mínimos. Por otro lado la temperatura de las paredes exteriores e interiores del horno.

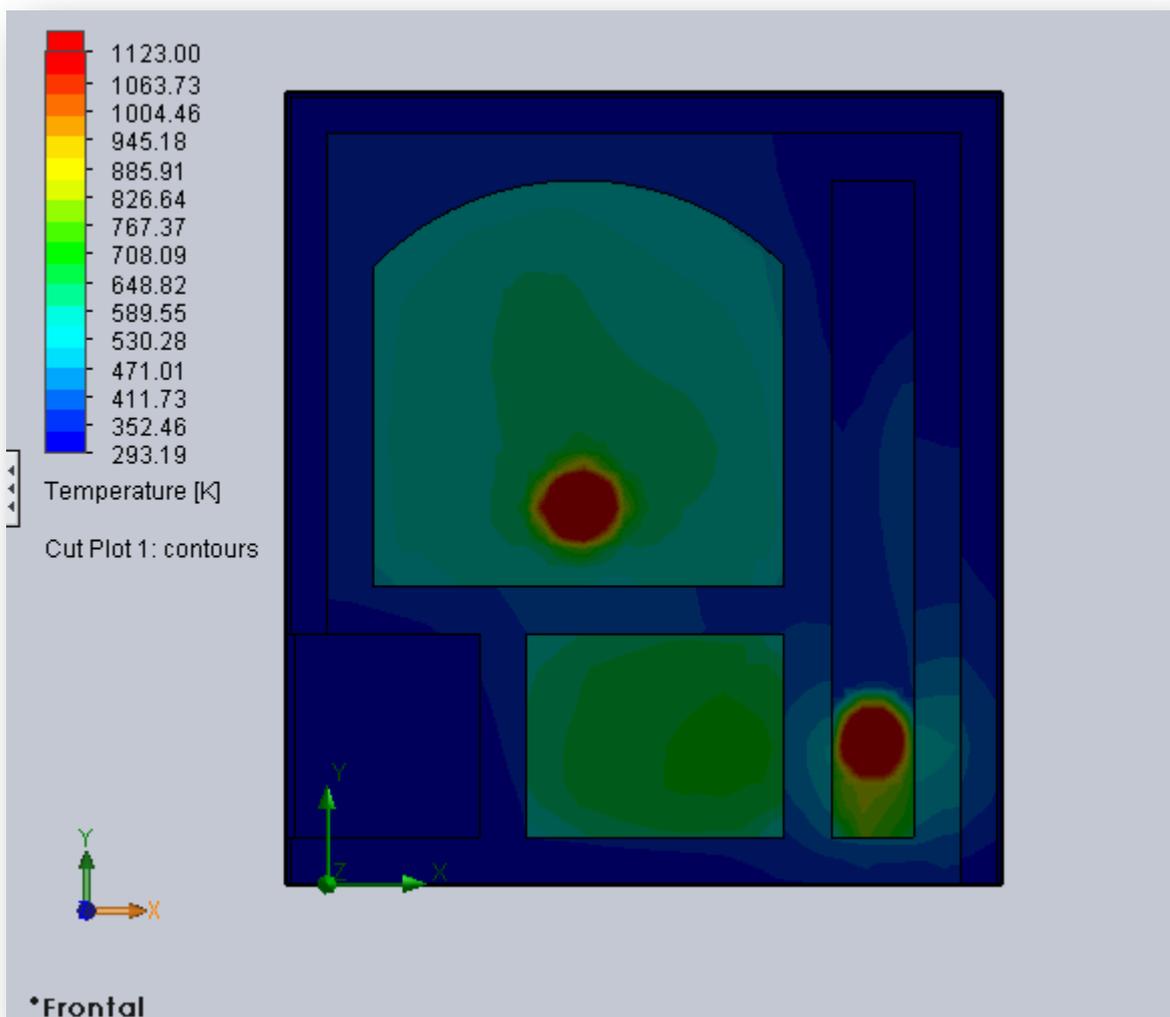
Con estos datos ya se puede pulsar el botón *Run* para comenzar la simulación. Una vez los cálculos han terminado, ya se pueden obtener los resultados.

4.2.1 Análisis de temperaturas

En primer lugar se van a analizar las temperaturas alcanzadas en el horno. Para ello se dibuja la trayectoria del flujo dentro del horno y su temperatura:



Se observa que a la salida de los quemadores es donde más caliente está el gas, con temperaturas que llegan a los 1939,33 K que se calcularon previamente. Las temperaturas más bajas se alcanzan a la salida del horno y en una zona de bajas temperaturas que se crea en la parte superior de la cámara secundaria, justo tras traspasar los gases el puerto de transferencia. Para poder observar las temperaturas con mayor precisión se lleva a cabo un corte transversal:



En este corte se observa como las temperaturas en las dos zonas frías apenas es mayor que la ambiente.

Además, se ha fijado la temperatura máxima de la escala en 850°C (1123 K) que es la temperatura mínima de operación requerida en el horno. Esto permite observar que la temperatura en el interior del horno no llega a alcanzar esos valores, excepto en los puntos de aplicación de los quemadores. La siguiente tabla muestra los valores de temperatura exactos del fluido en contacto con las paredes de la cámara principal:

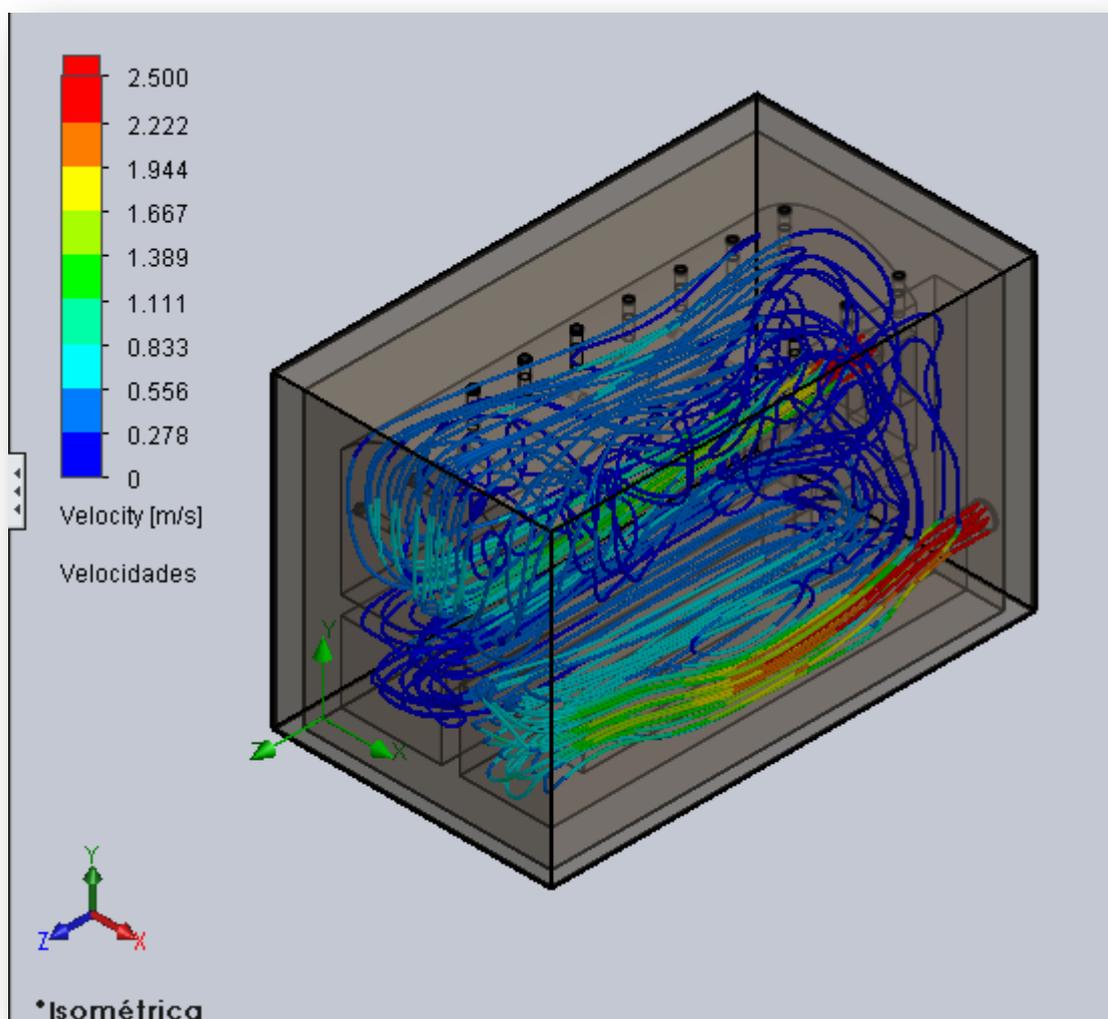
Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura fluido	K	338,21	725,76	390,74

Tabla 4.

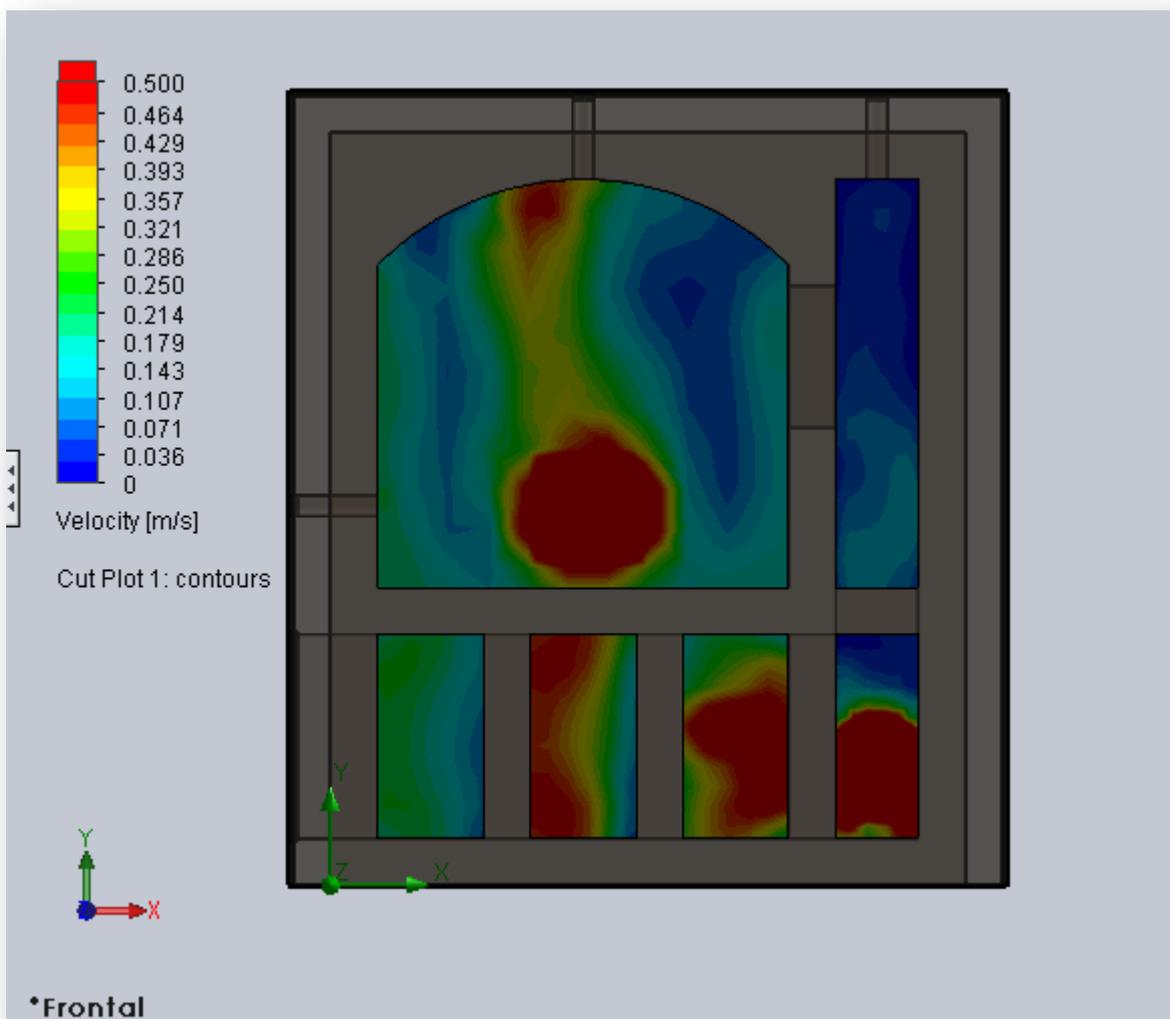
La temperatura máxima es de 725,76 K o 452,76°C. Esta temperatura es claramente insuficiente, por lo que se deduce que la potencia de los quemadores que se había supuesto es menor a la requerida.

4.2.2 Análisis de velocidades y presiones

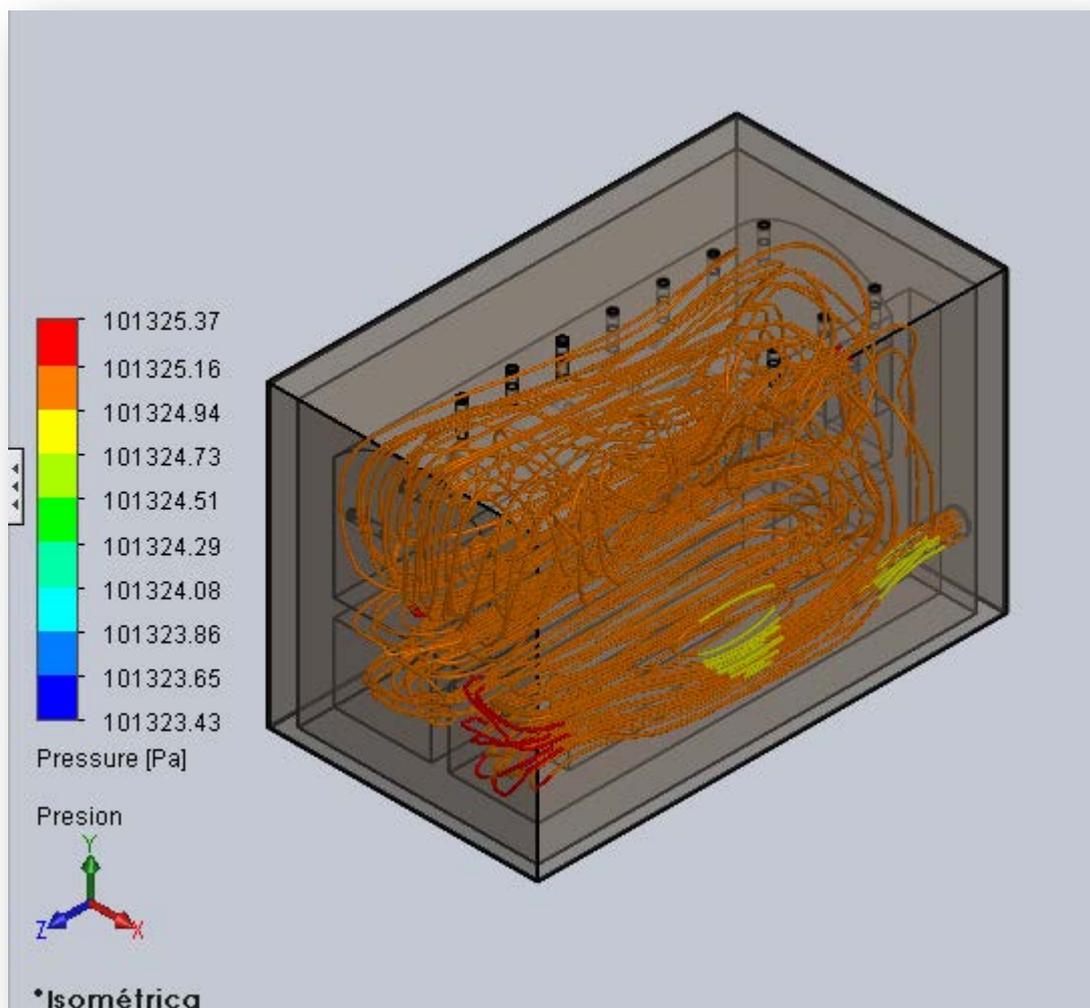
En primer lugar se dibuja la trayectoria del flujo junto con la velocidad:



La velocidad a la salida de los quemadores es elevada pero después disminuye rápidamente, cayendo a valores demasiado bajos, especialmente sobre los puertos de transferencia y a la salida del horno, es decir, en las zonas frías. Por lo tanto también se necesita aumentar la potencia de los quemadores para obtener mayores velocidades y evitar zonas muertas como las que se aprecian en los puntos mencionados:



Se analiza también la caída de presión que se produce:



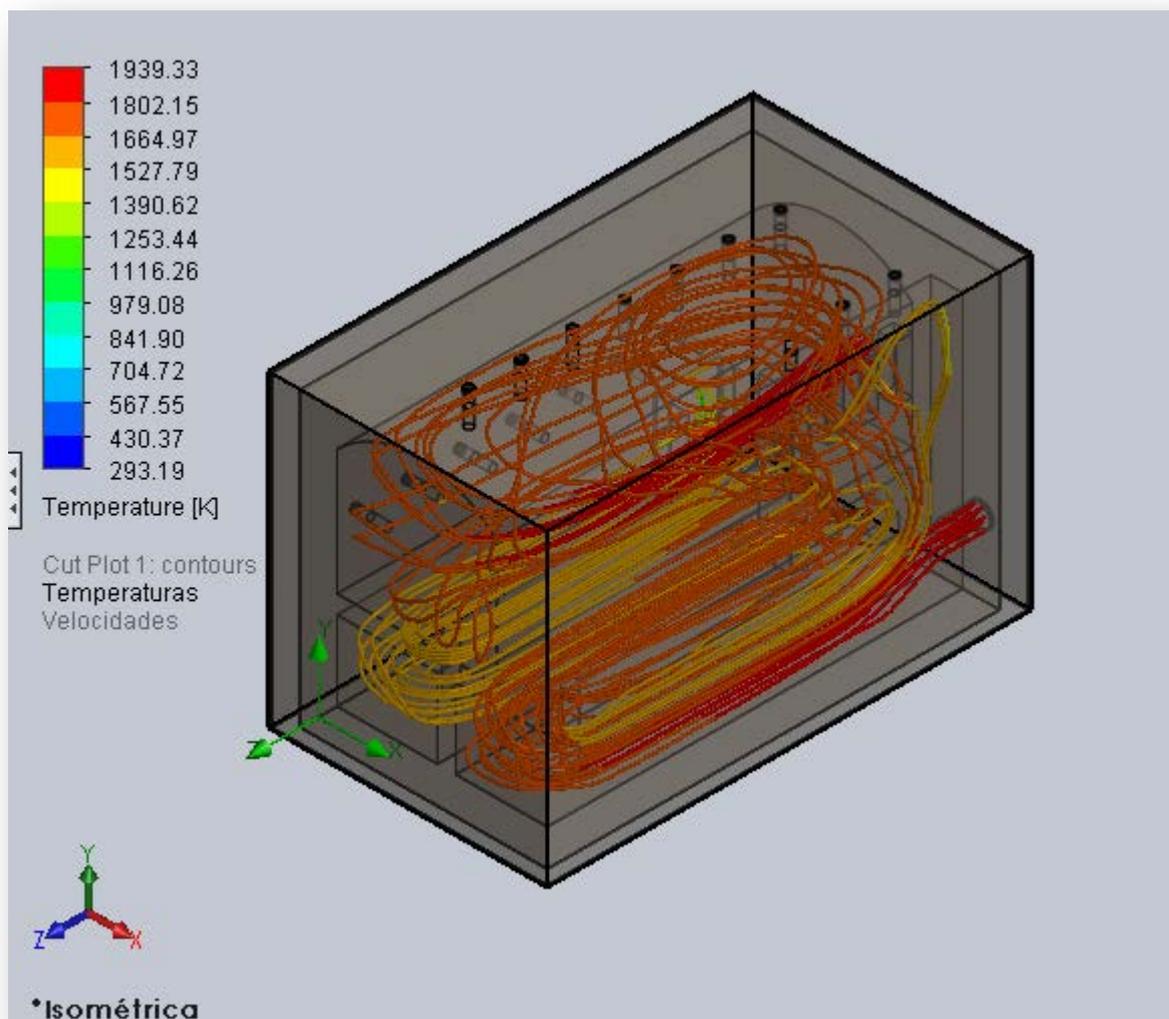
La caída de presión es prácticamente despreciable en este caso.

4.3 SEGUNDA SIMULACIÓN

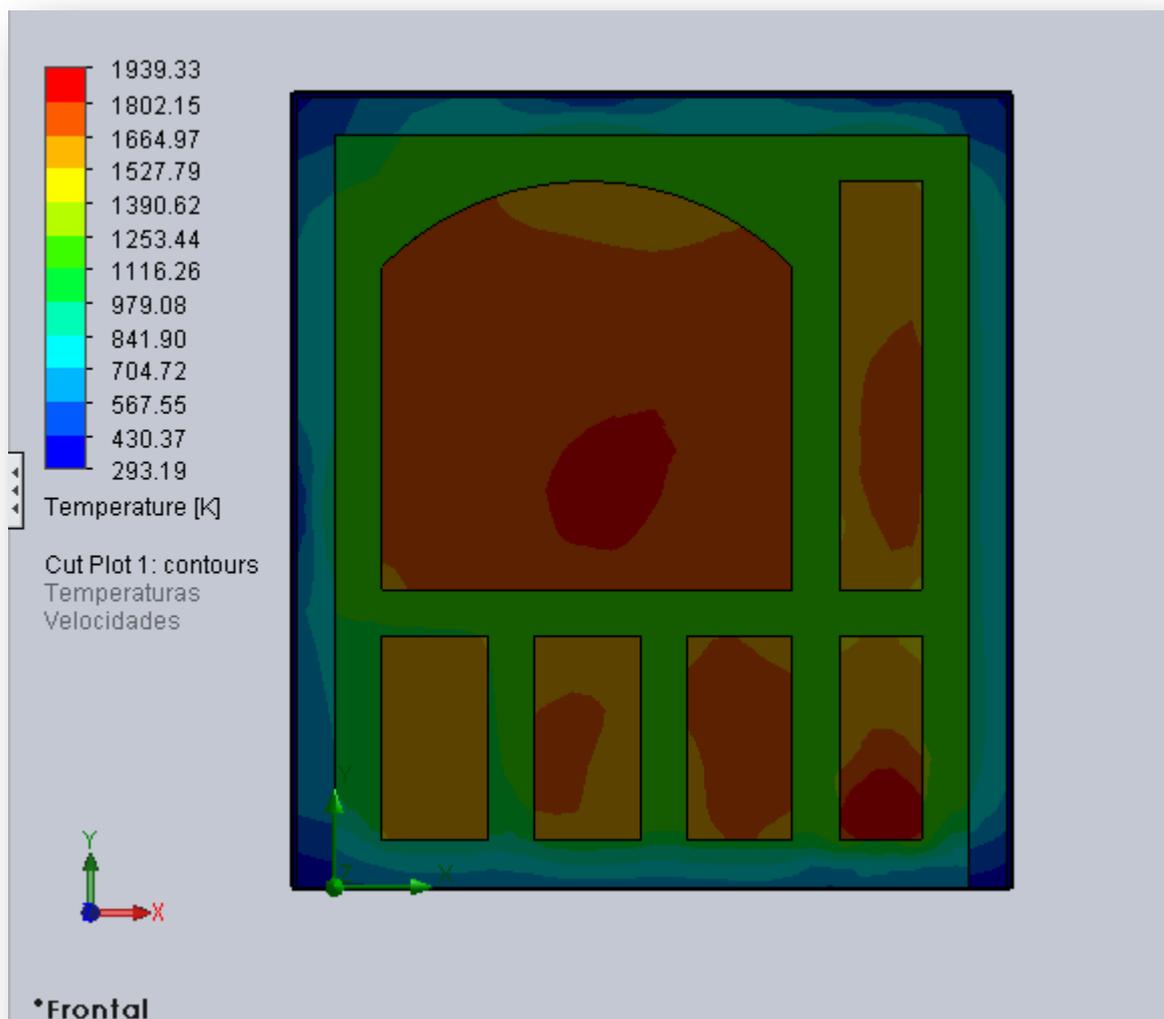
Los bajos valores de temperatura y presión obligan a aumentar la potencia de los quemadores y repetir el análisis. Se lleva pues a cabo otra simulación idéntica a la anterior excepto por el flujo másico de entrada, que se aumenta a 0,135 kg/s por quemador. Los resultados obtenidos se analizan a continuación.

4.3.1 Análisis de temperaturas

Se dibuja el flujo de los gases de combustión y su temperatura:



Se aprecia el aumento claro de la temperatura respecto a la simulación anterior:



Sin embargo, se aprecia que las temperaturas de los gases de combustión han aumentado en casi todo el horno por encima del valor límite establecido de 1100°C (1373 K). Se obtiene el valor de la temperatura de las paredes internas de la cámara principal así como de las paredes externas del horno para comprobar si se superan la temperatura máxima establecida en cada caso:

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes interiores cámara principal	K	1187,68	1470,51	1250,23

Tabla 5.

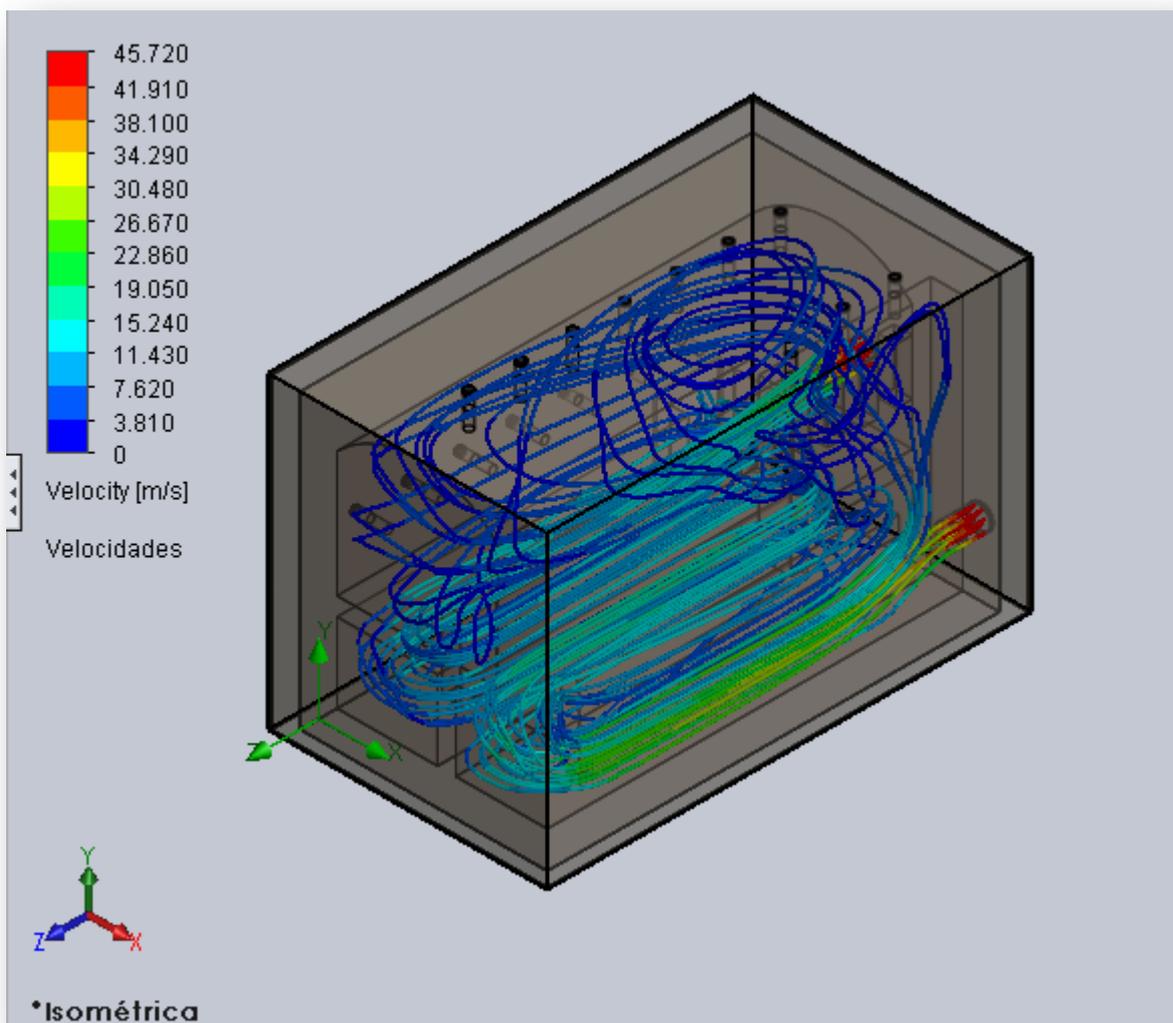
Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes exteriores del horno	K	299,62	346,91	312,42

Tabla 6.

En ambos casos se superan las temperaturas máximas establecidas. En el caso de las paredes internas se llega hasta los 1470,51 K superando los 1096°C (1369 K) que se habían calculado como máxima temperatura admisible de las paredes internas en el Anexo A. En el caso de las paredes externas se llega hasta los 346,91 K superando los 60°C (333 K) que establece como máximo el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. La conclusión que se extrae es que la potencia de los quemadores es excesiva provocando un calentamiento de los gases por encima de los valores deseados. Se podría configurar el horno de manera que se apagaran los quemadores cuando las temperaturas llegaran al nivel deseado, pero se estaría desperdiciando potencia por lo que conviene aproximar más el quemador a la potencia justa.

4.3.2 Análisis de velocidades y presiones

Las velocidades se pueden observar en la siguiente captura:



Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Velocidad salida del horno	m/s	0,39	13,97	6,94	8,83

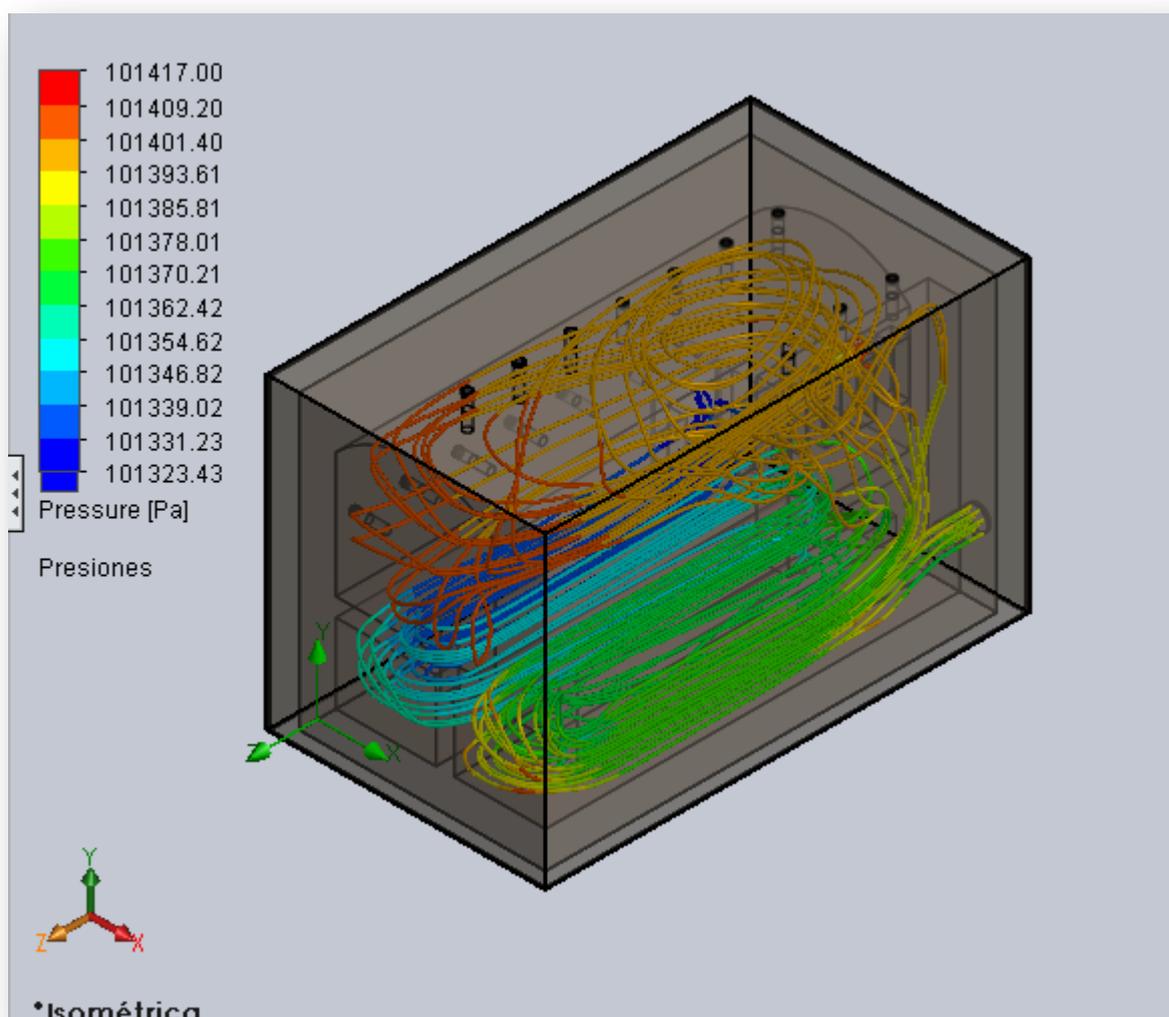
Tabla 7.

Incluso en la salida del horno la velocidad media supera el valor que aseguraría una permanencia de los gases en la cámara secundaria de al menos 2 segundos. Teniendo en cuenta que la longitud del interior del horno es de 2,6 m y que hay cuatro pasos, los gases deberán recorrer 10 m en

más de 2 segundos, por lo que la velocidad en la cámara secundaria no debería superar los 5 m/s.

Se concluye que el quemador también provoca unas velocidades demasiado elevadas, provocadas por el exceso de potencia.

Un análisis de la presión permite observar también el aumento notable de la caída de presión requerida:



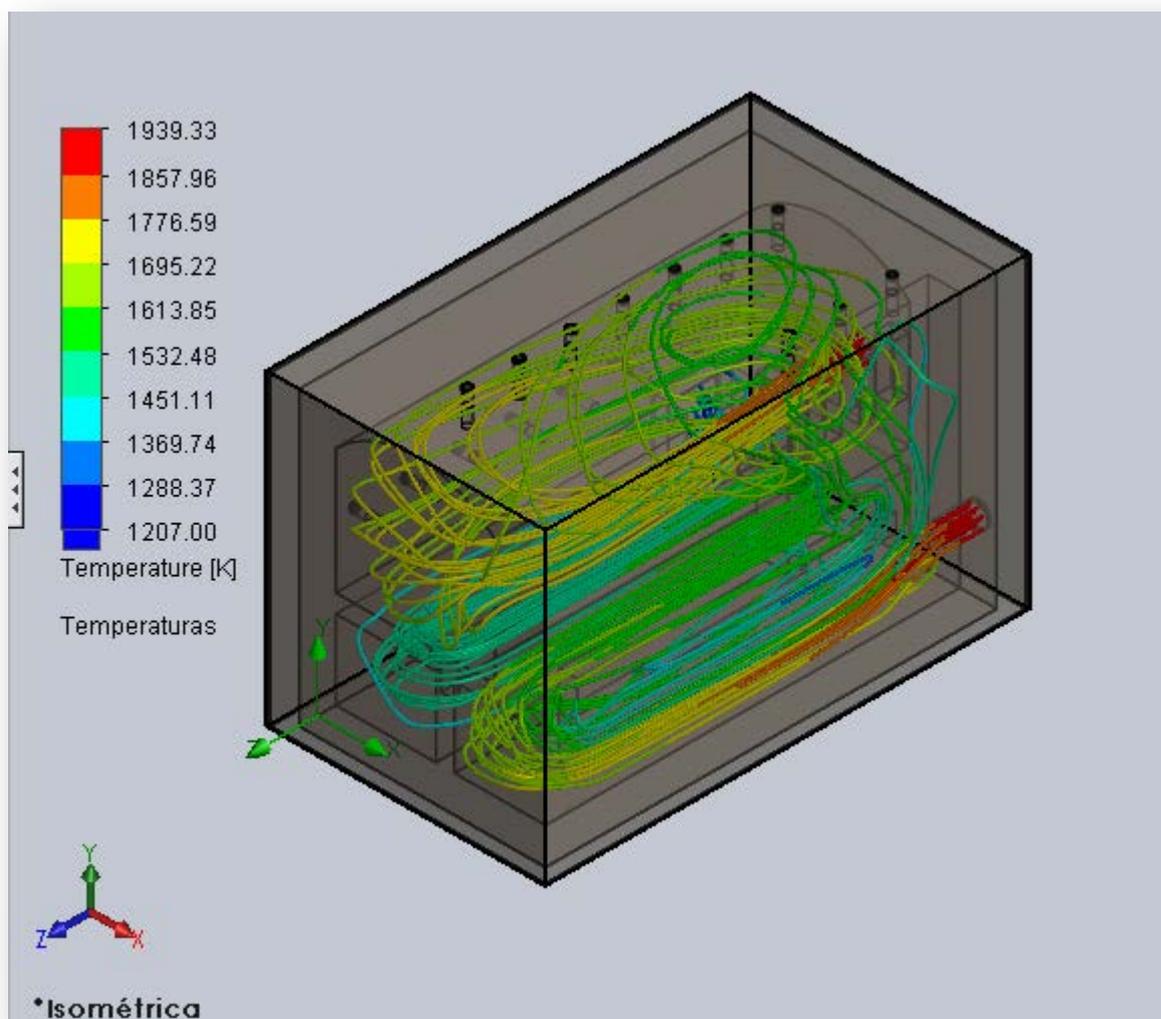
4.4 TERCERA SIMULACIÓN

Se lleva a cabo una tercera simulación con un flujo másico menor que el anterior pero mayor que en el primer análisis. Se fija pues el flujo másico

en cada quemador en 0,0675 kg/s. Los resultados se analizan a continuación.

4.4.1 Análisis de temperaturas

Las temperaturas que se alcanzan en el interior son las siguientes:



Se alcanzan 1123 K en todos los puntos del interior del horno. Además, se aprecian temperaturas superiores al límite en el interior de la cámara principal. Sin embargo, dado que se trata de un análisis estacionario, lo que se debe comprobar para garantizar que no se superen las temperaturas máximas es directamente la temperatura de las paredes:

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes interiores cámara principal	K	1069,36	1345,13	1124,59

Tabla 8.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes interiores cámara secundaria	K	653,53	1335,31	1088,26

Tabla 9.

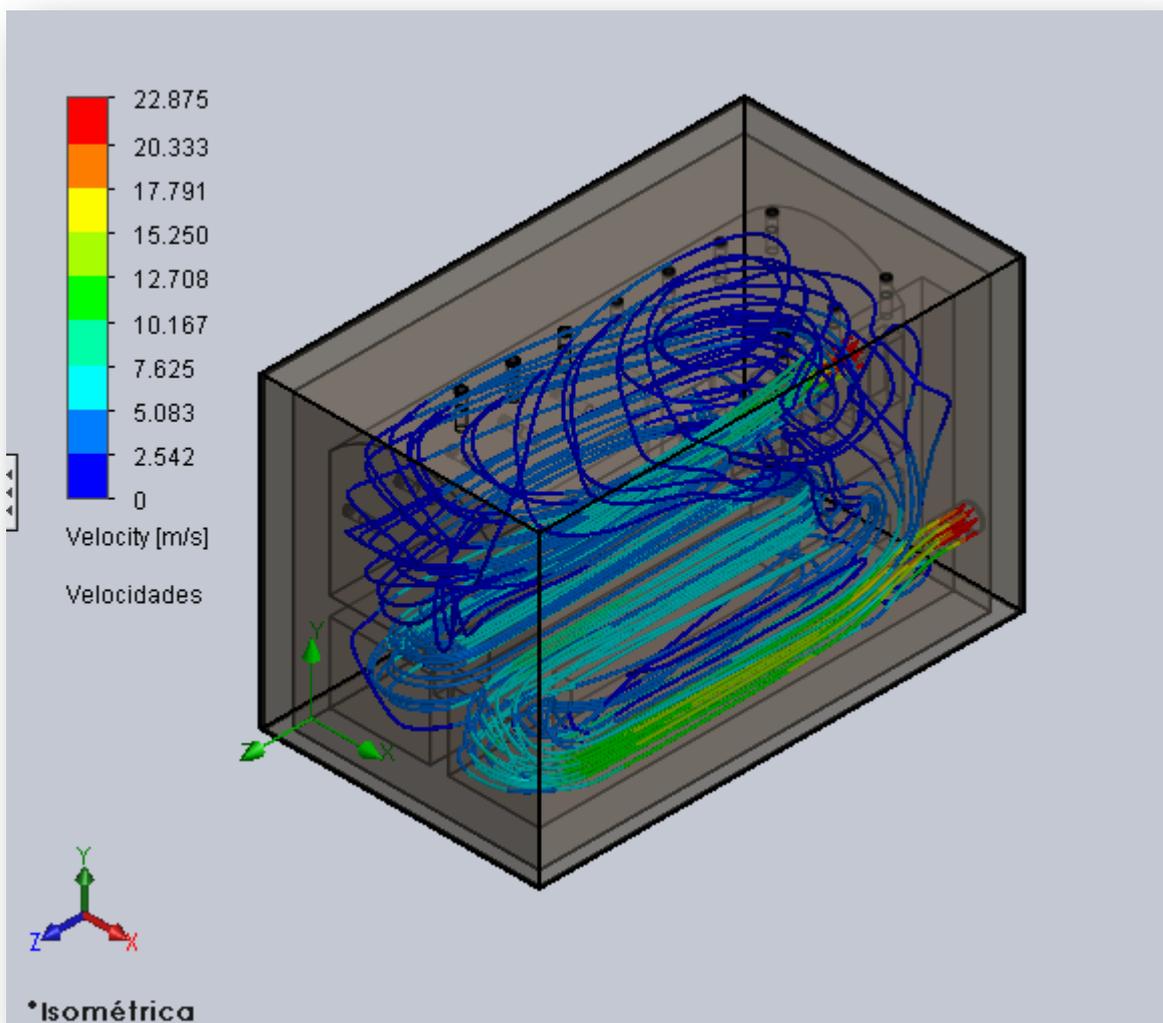
Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes exteriores del horno	K	298,57	313,23	308,53

Tabla 10.

La temperatura máxima de las paredes internas no supera el límite de 1369 K, tampoco la de las paredes externas supera el límite de 333 K, por lo que la condición de temperatura máxima se cumple.

4.4.2 Análisis de velocidades y presiones

Las velocidades en el interior del horno son las siguientes:



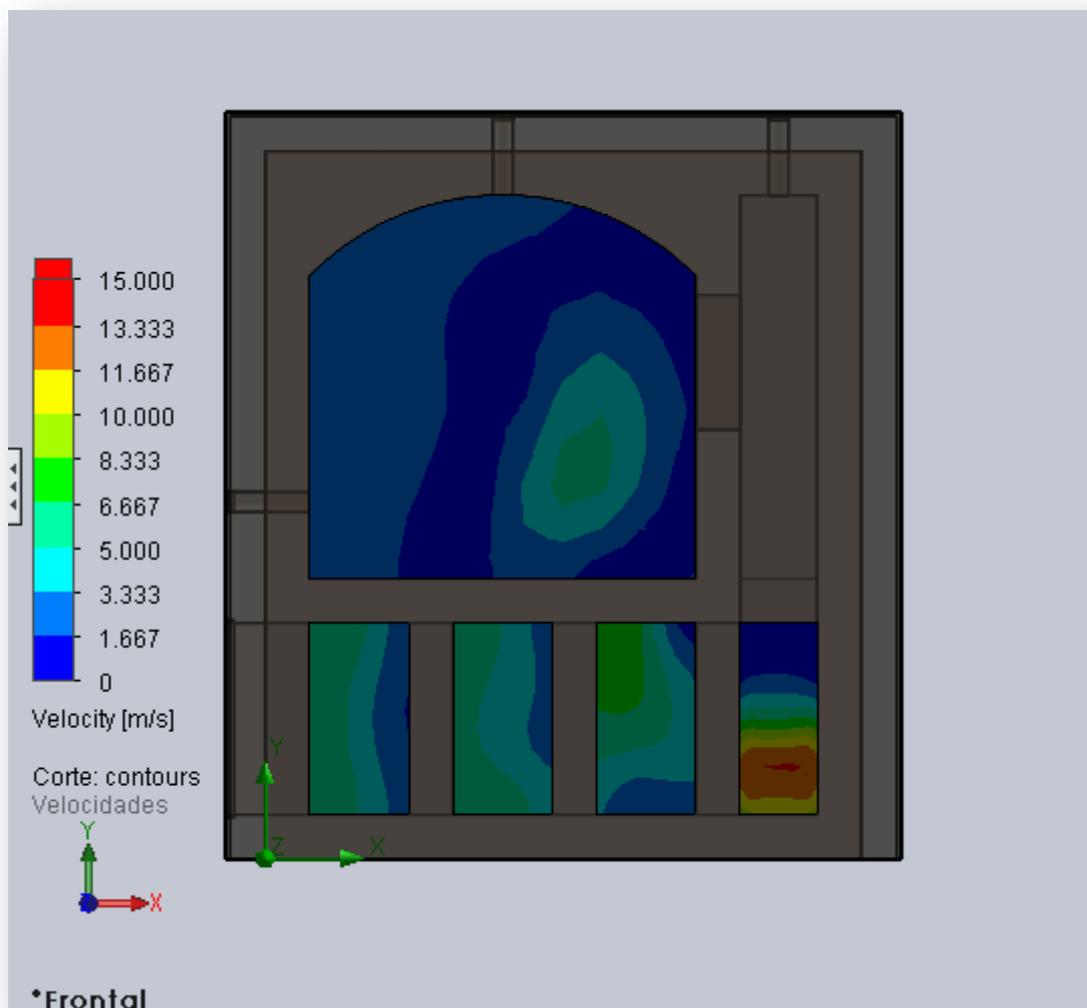
Se observan unos valores muy elevados en frente de los quemadores, pero las velocidades son más bajas en el resto del horno.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Velocidad salida del horno	m/s	0,21	6,14	3,16	4,02

Tabla 11.

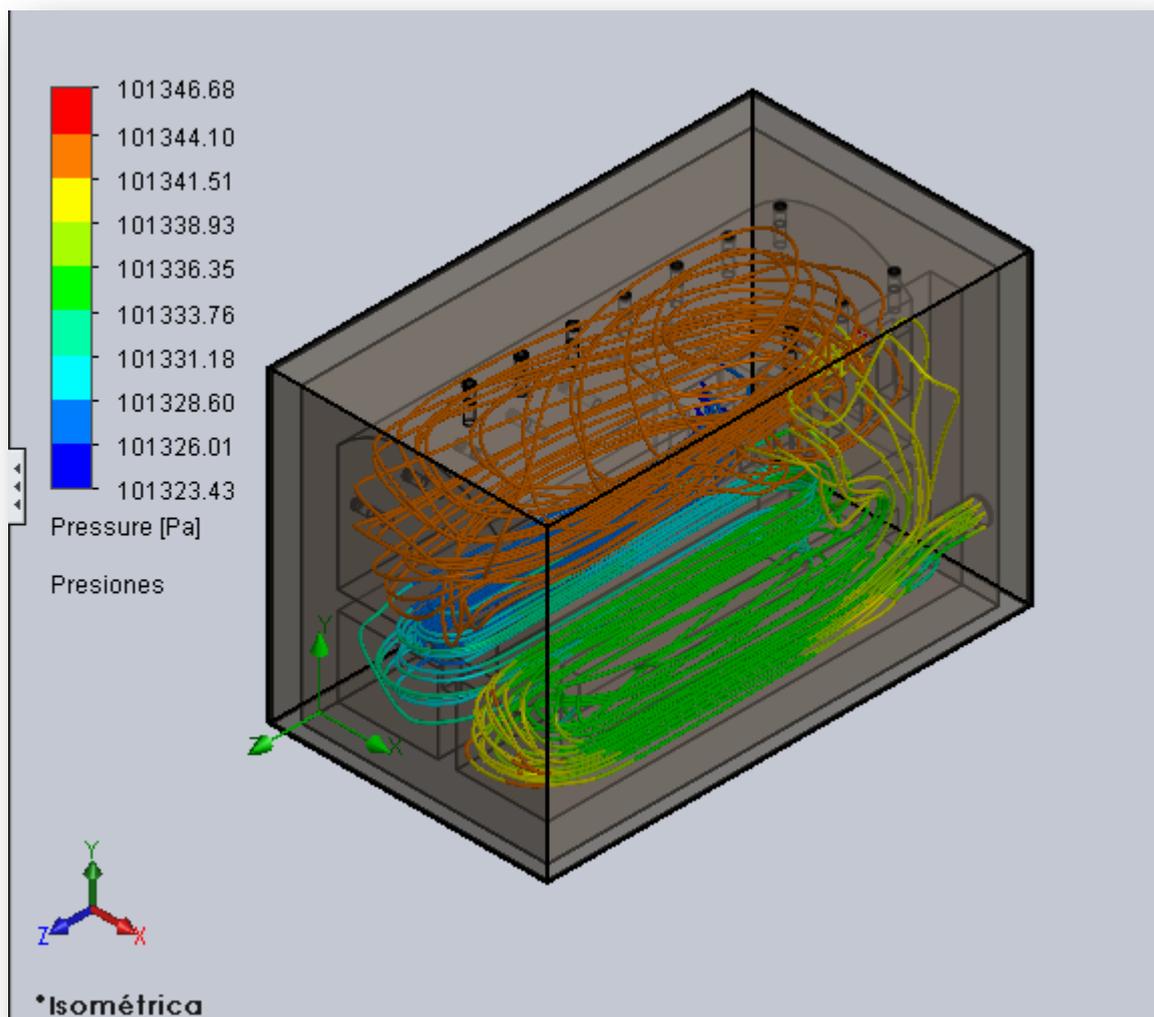
La velocidad a la salida del horno es de unos 4,02 m/s por lo que se cumpliría con la condición de permanencia de los gases en la cámara secunda-

ria. Pero las velocidades en el resto de la cámara secundaria son mayores cuanto más nos acercamos al quemador:



Los valores en el primer paso son bastante elevados, mientras que en los otros tres se mantienen al nivel de la salida. Es necesario añadir un método de control de la velocidad en la cámara secundaria, lo cual se tratará más adelante.

En cuanto a las presiones, la caída de presión es mayor que en el primer análisis pero bastante menor que en el anterior:



4.5 CUARTA SIMULACIÓN

El horno de la tercera simulación cuenta con una potencia de los quemadores suficiente para calentar el interior hasta los niveles deseados. Sin embargo, con el objetivo de un mayor control sobre la temperatura del horno durante el proceso de combustión al introducir el ataúd, resulta conveniente dimensionar el quemador de la cámara principal con una potencia bastante mayor a la estrictamente necesaria. Así se conseguirá además reducir notablemente el periodo de calentamiento permitiendo aumentar el número de cremaciones que se pueden realizar. Como ya se explicó, durante la cremación el quemador principal se encuentra la mayor parte del tiempo apagado, manteniéndose el calor dentro de la cámara

ra principal gracias a la combustión de la carga, a la ventilación de realimentación y a la radiación emitida por las paredes. Solo se encenderá en caso de que la temperatura caiga por debajo del límite establecido. Es por esto que interesa tener un quemador potente en la cámara principal, capaz de calentar las paredes en un tiempo relativamente corto, para que posteriormente la combustión pueda llevarse a cabo sin aportes energéticos extras.

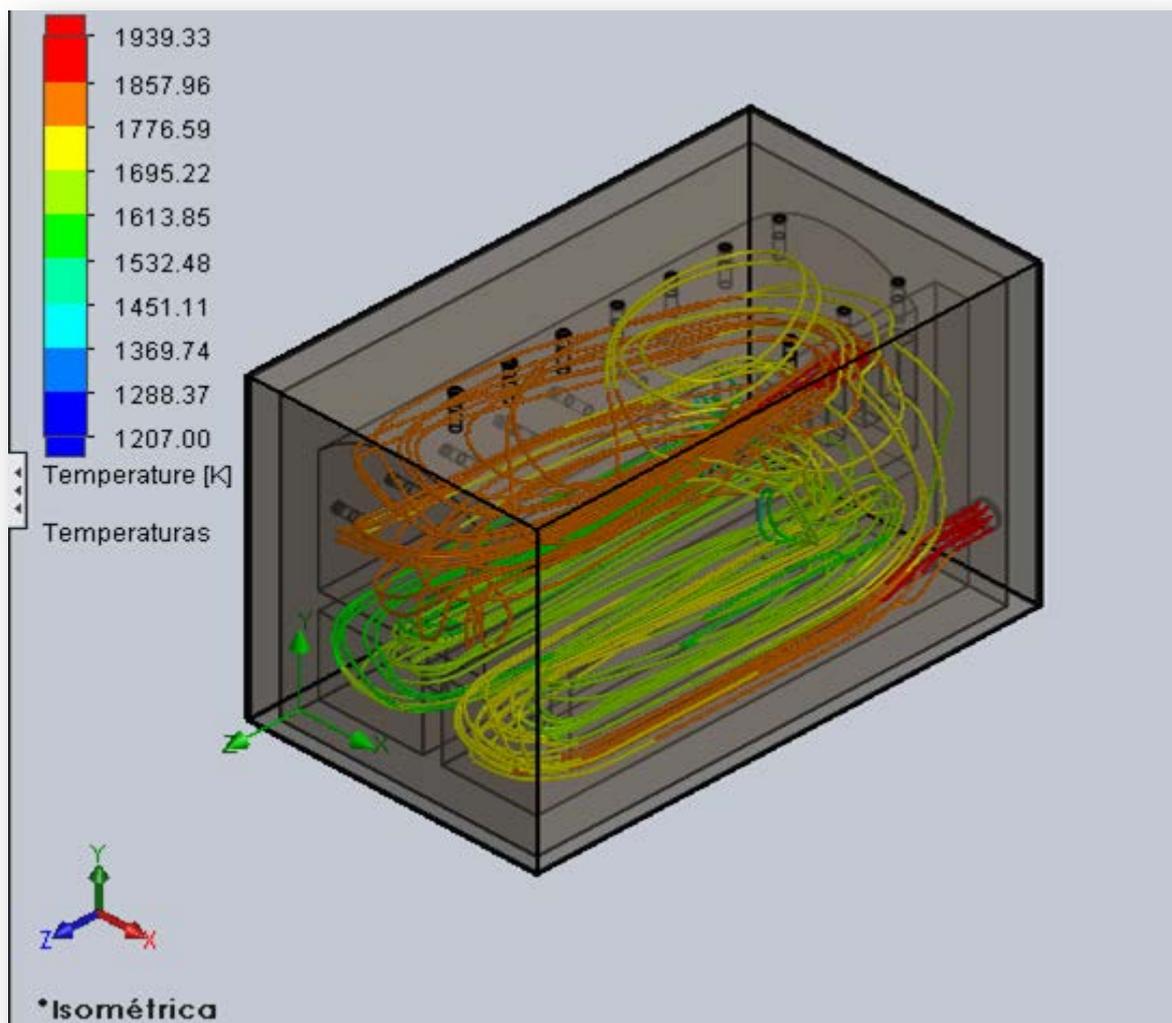
De igual manera, también resulta conveniente colocar un quemador con una potencia algo mayor que la necesaria en la cámara secundaria. Se tendrá así un mayor control sobre la temperatura, lo que aportará una mayor seguridad si, por ejemplo, la temperatura en la cámara secundaria cae bruscamente durante el proceso de cremación por debajo de los 850°C. La mayor potencia del quemador permitirá aumentar la temperatura de forma más rápida. No obstante, dado que el quemador de la cámara secundaria estará en general encendido durante todo el proceso, no hace falta añadirle tanta potencia como al principal, ya que su objetivo es mantener los gases al menos a 850°C y no calentar las paredes como ocurre en la cámara principal.

El flujo másico proporcionado por los quemadores se aumenta pues hasta 0,2 kg/s en la cámara principal y hasta 0,1 kg/s en la cámara secundaria. Se lleva a cabo una nueva simulación para comprobar si efectivamente las temperaturas y velocidades son mayores que los máximos definidos.

Finalmente, hay que tener en cuenta que una potencia por encima de la estrictamente necesaria podría provocar un aumento excesivo de las temperaturas, por lo que será necesario añadir un método de control, lo cual se realizará en apartados posteriores.

4.5.1 Análisis de temperaturas

Se obtienen los siguientes resultados:



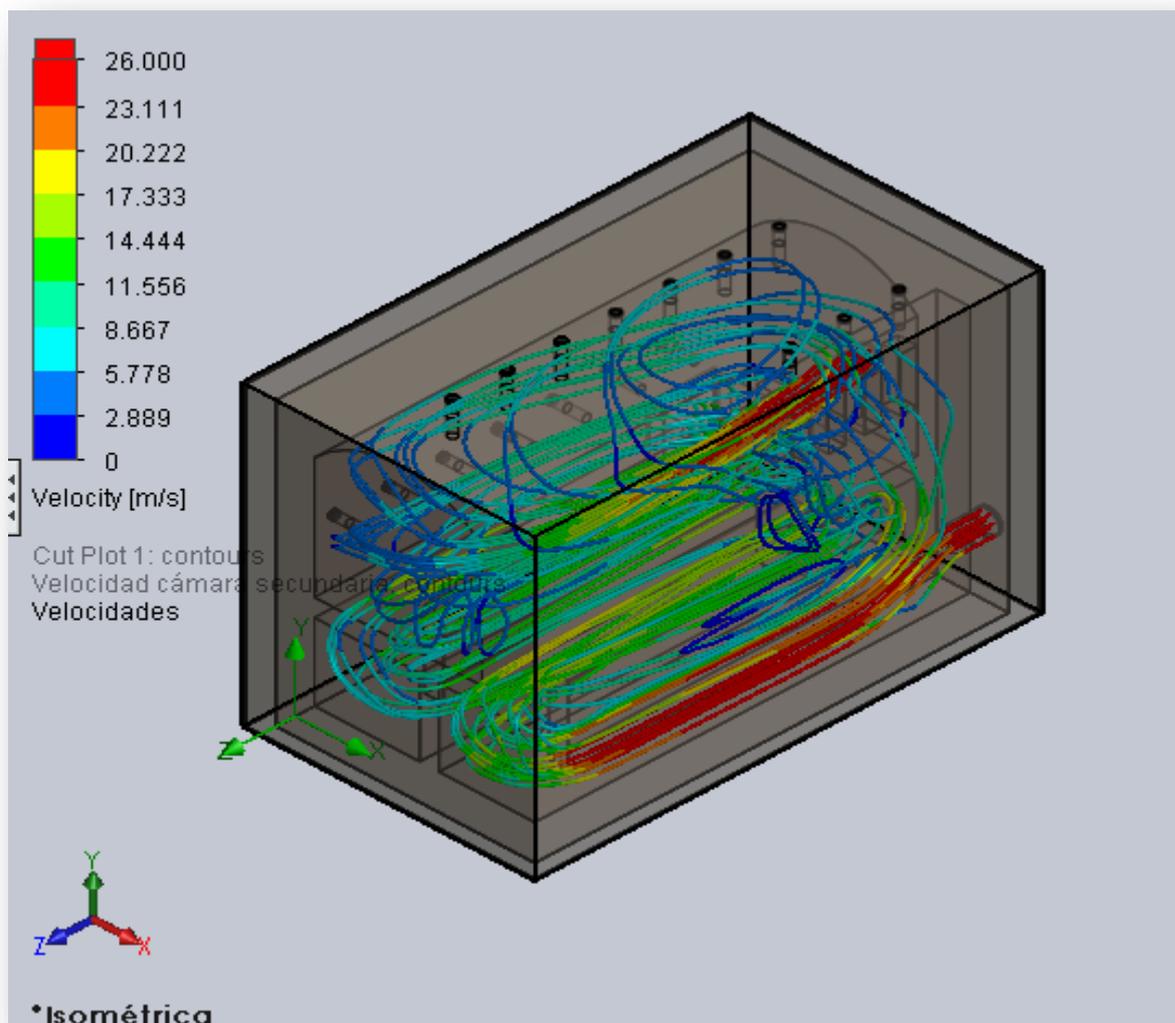
Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes interiores cámara principal	K	1244,62	1534,42	1313,09

Tabla 12.

Se comprueba que efectivamente el valor máximo supera los 1369 K.

4.5.2 Análisis de velocidades y presiones

Las velocidades en el horno son las siguientes:



Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Velocidad salida del horno	m/s	0,31	15,67	7,66	9,82

Tabla 13.

Se observa que incluso en la salida de la chimenea la velocidad aparente es mayor a 5 m/s por lo que no se cumpliría en absoluto la condición de permanencia.

Se decide finalmente emplear un quemador en la cámara principal capaz de proporcionar un flujo másico de 0,2 kg/s mientras que en la cámara

secundaria se emplea uno capaz de proporcionar un flujo másico de 0,1 ks/s. De acuerdo a lo operado en el apartado 2.4 del Anexo A, y operando de manera inversa, se obtiene que esto equivale a un quemador de 290 kW de potencia máxima en la cámara principal y a otro quemador de 145 kW en la secundaria.

El exceso de potencia hace necesario implementar métodos de control en el horno, que se encarguen de asegurar que no se sobrepasan los valores límites de temperatura y/o velocidad. Esta implantación se lleva a cabo más adelante, cuando se disponga de un modelo final del horno.

5 CÁLCULOS DE LA CHIMENEA

El siguiente paso consiste en añadir la chimenea al modelo. Para ello, en primer lugar, se debe dimensionar la chimenea. En este momento, se deben tener en cuenta tres aspectos bien diferenciados: su sección interior, la altura hasta la que va a llegar y los materiales que la forman. Para calcular estos valores, se debe cumplir con lo dispuesto en la Orden de 18 de octubre de 1976, de Prevención y Corrección de la Contaminación Atmosférica de Origen Industrial. Esta norma ya fue mencionada en el documento Memoria y establece las condiciones de altura de chimeneas, equipos de mediciones y toma de muestras en chimeneas.

Hay que tener en cuenta que los cálculos que siguen se utilizan solo para obtener una aproximación inicial de la chimenea que finalmente se empleará, ya que antes de que el modelo sea validado se llevará a cabo una simulación térmica, realizándose entonces las modificaciones que fueran necesarias.

5.1 SECCIÓN

En primer lugar se calcula la sección interior de la chimenea, por la que pasan los gases que salen del horno antes de salir al exterior. La determinación de la sección tiene como principal objetivo alcanzar una determinada velocidad de salida de los gases de combustión a la atmósfera, ya que la relación entre ambas es inversamente proporcional, y viene establecida por la siguiente fórmula:

$$S = \frac{Q \times T}{273,16 \times V \times d}$$

Donde:

- S es la sección, en m².
- Q es el caudal másico de gases que atraviesan la chimenea, en kg/s.
- T es la temperatura de esos gases en la chimenea, en K.

- V es la velocidad que se quiere que esos gases tengan al atravesar la chimenea, en m/s.

- d es la densidad de los humos de combustión en condiciones normales, en kg/m³.

Los valores se toman de la última simulación que se ha realizado. De esta manera se garantiza que la chimenea se dimensiona de tal manera que sea capaz de cumplir su función y soportar las temperaturas en cualquiera de los casos posible.

Así, el caudal másico máximo que puede atravesar la chimenea será la suma de los dos caudales procedentes de los quemadores que son de 0,2 kg/s y 0,1 kg/s. Luego aquí $Q = 0,3$ kg/s.

La temperatura de los gases a la salida de la cámara secundaria se toma de la siguiente tabla (que se obtiene en los resultados de la última simulación):

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Temperatura a la salida	K	293,2	1564,31	1036,09	1228,82

Tabla 14.

En cuanto a la velocidad, se considera un valor medio de $V = 10$ m/s como adecuado en este tipo de aplicaciones.

La densidad de los humos en condiciones normales de 1 atm y 0°C se puede asemejar a la del aire, por lo que el valor que se toma es $d = 1,29$ kg/m³.

La sección es:

$$S = \frac{0,3 \times (1228,82)}{273,16 \times 10 \times 1,29} = 0,1m^2 = 1046,17cm^2$$

La Orden de 18 de octubre de 1976 establece que “las chimeneas se construirán a ser posible de sección circular”, por lo que se calcula el radio de la chimenea:

$$A = \pi \times R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{0,1}{\pi}} = 0,18m = 18,25cm$$

5.2 ALTURA

La Orden de 18 de octubre de 1976 proporciona una fórmula para la obtención de la altura de una chimenea por la que se emiten gases contaminantes a la atmósfera. Sin embargo, para utilizar esta fórmula es necesario conocer el caudal másico emitido de cada una de estas sustancias contaminantes. Como este dato se desconoce, no se puede aplicar esta ecuación. No obstante, esta metodología determina una altura mínima de 8 metros, lo cual se tiene en cuenta.

Se lleva a cabo una aproximación inicial de la altura adecuada de la chimenea. Para ello se recurre a las normativas existentes en España. La comunidad autónoma de Cantabria carece por el momento de una normativa concreta al respecto, pero otras como el País Vasco si que han desarrollado dicha normativa.

En el caso del País Vasco, la Instrucción Técnica – 07 (IT-07) sobre la altura de chimeneas, establece que las chimeneas de las actividades catalogadas como grupo A o B según el Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación, deberán tener una altura mínima de 10 metros por encima del nivel del suelo y proyectarse como mínimo tres metros por encima de la cumbrera.

El Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, cataloga los crematorios como pertenecientes al grupo B, por lo que siguiendo estas recomendaciones se diseña la chimenea con una altura de 11 metros, ya que la altura de la nave industrial es de 8 metros.

Con esta altura se facilita la dispersión de contaminantes minimizando las incidencias ambientales y sanitarias. Si se comprobara posteriormente que esta altura no es suficiente, debería elevarse la misma aún más.

No obstante, esta aproximación se considera válida ya que los crematorios cuentan con chimeneas de unos 10 metros de altitud, aproximadamente, debido a sus niveles de emisiones. Por ejemplo, el crematorio de Virgen del Castillo, Murcia, cuenta con una chimenea de 10,30 metros; mientras que en el situado en el Polígono de Raos, Cantabria, la altura es de 9,8 metros.

5.3 MATERIALES

El factor más importante a la hora de seleccionar los materiales con los que se debe construir la chimenea es la temperatura de los gases a su paso por la misma. El análisis de la última simulación muestra una temperatura media de los gases de 1228,82 K o 955,82°C. Es por esto que se diseña la chimenea de la manera que sigue:

- Una cavidad inferior de 40 cm de ancho, 50 cm de alto y 50 cm de largo. Se trata del espacio al que llegan los gases según salen de la cámara secundaria, con la que está directamente conectada a través del orificio de 40 cm de ancho por 50 cm de alto que se practicó en el modelo inicial. Se construye con los mismos materiales y espesores que el horno: una capa de ladrillo refractario de 11,5 cm de espesor, una de aislante de 9 cm de espesor y una chapa de acero de 1 cm de espesor.
- Un conducto circular con una altura de 10,5 m y 18,25 cm de radio. Se construye con una capa interior de material aislante y una exterior de acero inoxidable. Se sitúa justo encima de la cavidad del punto anterior,

de tal manera que los gases procedentes del horno atraviesan dicha cavidad primero, después el conducto y finalmente salen a la atmósfera.

- Un conducto circular adicional situado 9 m por debajo del extremo superior del conducto principal, perpendicular al mismo y que sirve como tubo por el que se redirige parte del flujo que sale por la chimenea hacia el sistema de realimentación del horno. Se construye con los mismos materiales y espesores que el conducto principal para soportar las altas temperaturas, pero su radio es menor: 5 cm.

5.4 ESPESOR

Para calcular el espesor de los materiales que es necesario en la chimenea, se procede de forma análoga a lo hecho en el apartado 3 del Anexo A.

El coeficiente $h_{\text{conv rad,ext}}$ es el mismo que el calculado en el apartado 3 del Anexo A, ya que las condiciones del exterior no cambian. Así:

$$h_{\text{convrad,ext}} = 11,889 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

En cambio las condiciones en el interior no son las mismas, por lo que se hace necesario volver a calcular $h_{\text{conv rad,inte}}$.

De nuevo $h_{\text{conv,inte}}$ se aproxima a un valor de $40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Para obtener $h_{\text{rad,inte}}$ se debe recalcular el parámetro L_e :

$$L_e = 3,6 \times \left(\frac{V}{A}\right)$$

En este caso V será el volumen interior del conductor circular, y A la superficie interior:

$$V = (\pi \times R^2) \times h$$

$$A = (2 \times \pi \times R) \times h$$

En ambas fórmulas h es la altura del conducto, por lo que se obtienen los siguientes valores:

$$V = (\pi \times 18,25^2) \times 1050 = 1098664,04 \text{ cm}^3$$

$$A = (2 \times \pi \times 18,25) \times 1050 = 120401,54 \text{ cm}^2$$

Luego:

$$L_e = 3,6 \times \left(\frac{1098664,04}{120401,54} \right) = 32,85 \text{ cm} = 1,08 \text{ pies}$$

Las presiones parciales siguen siendo las mismas puesto que la composición de los gases es la misma, por lo que se tiene:

$$p_w \times L = 0,12 \times 1,08 = 0,13 \text{ pies} \times \text{ atm}$$

$$p_c \times L = 0,07 \times 1,08 = 0,08 \text{ pies} \times \text{ atm}$$

La temperatura de los gases es:

$$T_g = 1228,82 \text{ K} = 955,82^\circ \text{ C}$$

Con estos datos se entra en las tablas que aparecen en el apartado 3 del Anexo A, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\varepsilon_w = 0,055$$

$$\varepsilon_c = 0,07$$

Finalmente para obtener la corrección de mezcla se toman los siguientes valores:

$$T_g \geq 930^\circ \text{ C}$$

$$L \times (p_w + p_c) = 1,08 \times (0,12 + 0,07) = 0,21 \text{ pies} \times \text{ atm}$$

$$\frac{p_w}{p_c + p_w} = \frac{0,12}{0,12 + 0,07} = 0,632$$

La corrección de la mezcla es:

$$\Delta\varepsilon \approx 0$$

Ya se puede obtener ε_g :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta\varepsilon = 0,055 + 0,07 - 0 = 0,125$$

De nuevo se necesita suponer una temperatura de las paredes interiores.

Se suponen 1100 K o 827°C. Luego el coeficiente vale:

$$h_{rad,inte} = 0,125 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{(1228,82^4 - 1100^4)}{(1228,82 - 1100)} = 44,89 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se obtiene $h_{conv rad,inte}$ sumando ambos términos:

$$h_{conv rad,inte} = h_{conv,inte} + h_{rad,inte}$$

$$h_{conv rad,inte} = 40 + 44,89 = 84,89 \text{ W/m}^2\text{K}$$

A continuación se debe comprobar que la temperatura supuesta en la pared interior es aproximadamente la verdadera. Recurriendo a la analogía eléctrica se igualan los flujos de calor, de igual manera que en Anexo A. En primer lugar se calcula el flujo externo, que será el mismo que anteriormente, ya que la temperatura máxima admitida de las paredes externas sigue siendo la misma:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{sup.ext} - T_{ext}}{R_T}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{60 - 20}{0,084} = 476,19 \text{ W/m}^2$$

Mientras que el flujo interior sí cambia:

$$R_T = \frac{1}{84,89} = 0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{inte} - T_{sup.inte}}{R_T}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{1228,82 - 1100}{0,01} = 10935,53 \text{ W/m}^2$$

Los dos valores no están próximos, por lo que se repite el proceso suponiendo una temperatura bastante mayor, de 1215 K:

$$h_{rad,inte} = 0,125 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{(1228,82^4 - 1215^4)}{(1228,82 - 1215)} = 51,72 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_{conv rad,inte} = 40 + 51,72 = 91,72 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_T = \frac{1}{91,72} = 0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{1228,82 - 1215}{0,01} = 1382 \text{ W/m}^2$$

Se itera una vez más suponiendo una temperatura de 1224 K:

$$h_{rad,inte} = 0,125 \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{(1228,82^4 - 1224^4)}{(1228,82 - 1224)} = 52,29 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_{conv rad,inte} = 40 + 52,23 = 92,29 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$R_T = \frac{1}{92,29} = 0,01 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{1228,82 - 1224}{0,01} = 482 \text{ W/m}^2$$

Este valor se considera lo suficientemente próximo, por lo que ya se puede calcular la resistencia térmica que ha de tener la pared de la chimenea:

$$R_T = \frac{T_{sup.inte} - T_{sup.ext}}{\frac{Q}{A}}$$

$$R_T = \frac{955,82 - 60}{476,19} = 1,82 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Si se toma de nuevo una capa de panel microporoso ISO-AL de conductividad $k = 0,04 \text{ W/m K}$ se requerirá el siguiente espesor:

$$R_t = \frac{esp}{k}$$

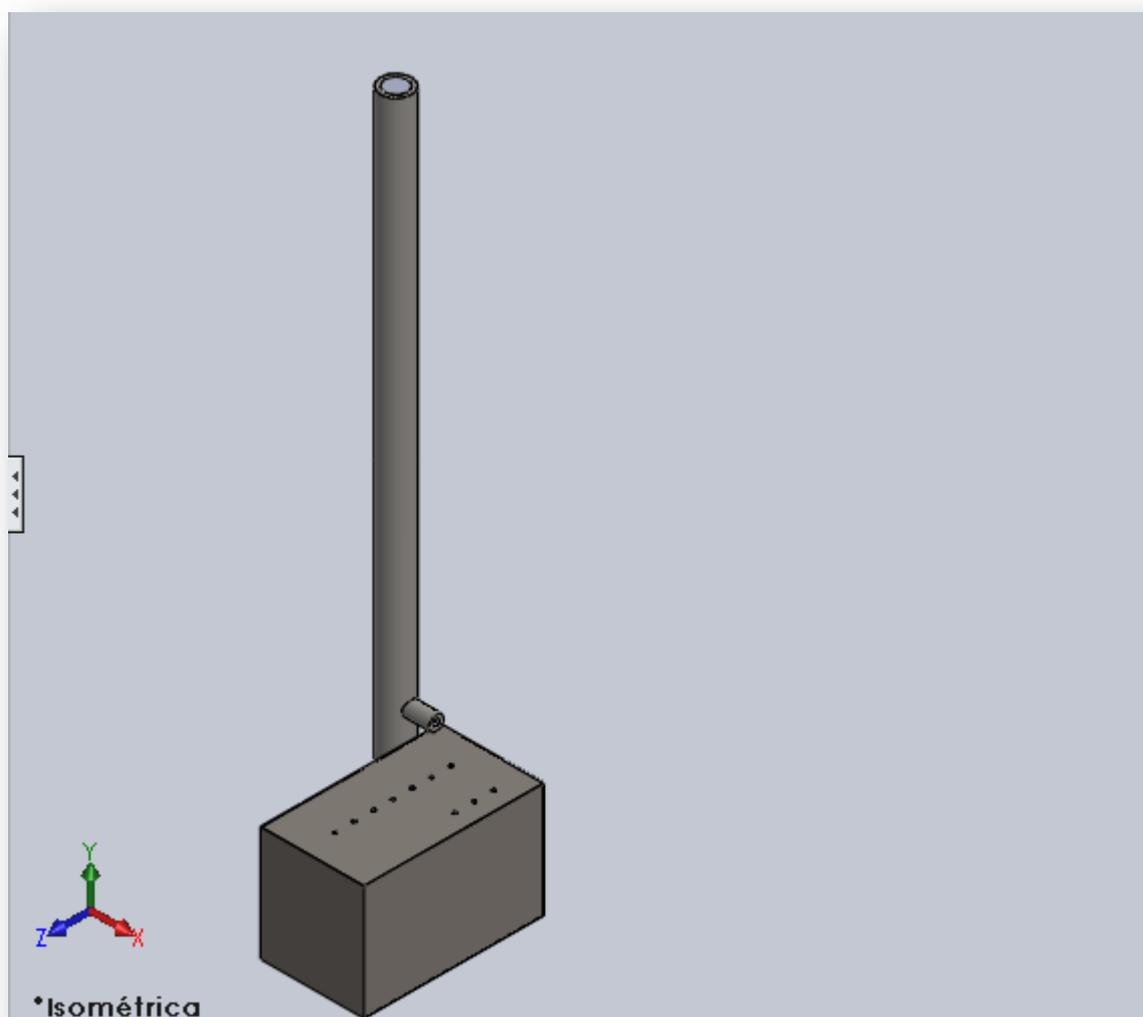
$$esp = R_T \times k$$

$$esp = 1,82 \times 0,04 = 0,07 \text{ m}$$

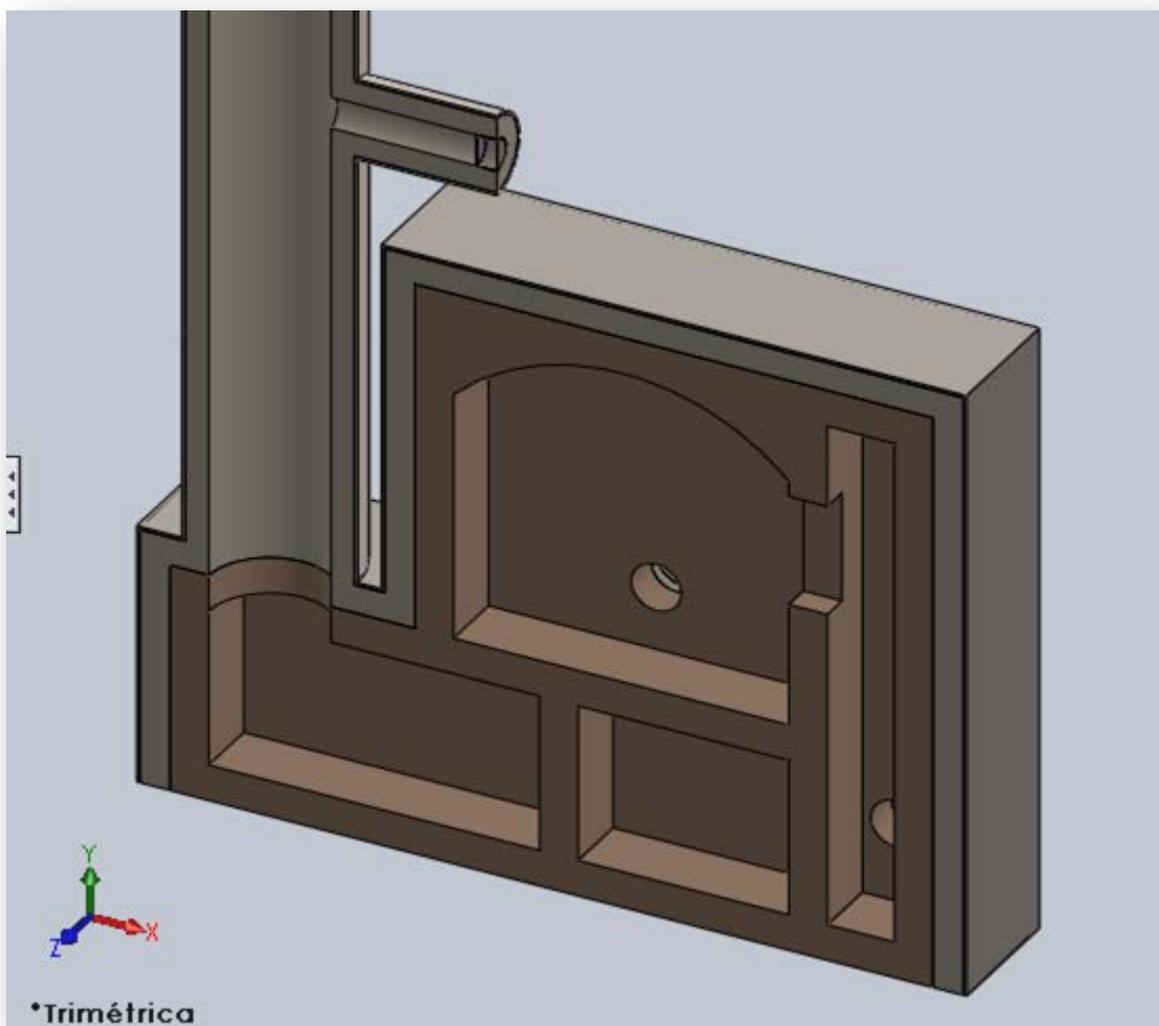
Por lo que se toma una capa de panel microporoso de 7 cm de espesor. La chimenea se construirá a partir de módulos cilíndricos de acero inoxidable de 50,5 cm de diámetro interior y 52,5 cm de exterior. Toda la superficie interior de estas piezas se recubrirá con los paneles aislantes.

6 MODELO INICIAL DE LA CHIMENEA

Una vez que ya se han realizado los cálculos relativos a la chimenea, se modela la misma en *SolidWorks*. Los pasos a seguir son los mismos que al realizar el modelo del horno. La chimenea se diseña según las especificaciones del apartado 5, y se acopla a la pieza inicial del horno, de tal forma que se tiene una única pieza en la que se contienen tanto el horno como la chimenea:



Los materiales empleados son los mismos que en el modelo inicial del horno (Tabla 1), añadiendo la chapa de acero inoxidable cuyo valor de conductividad térmica es de 16,3 W/m K. En el siguiente corte se aprecian los materiales:



7 SIMULACIONES DE LA CHIMENEA SIN REALIMENTACIÓN

En estas simulaciones se analiza el horno y la chimenea en una sola pieza, la mostrada en el apartado anterior. El sistema de realimentación se ignora, por lo que no se añade ninguna condición de contorno en el mismo.

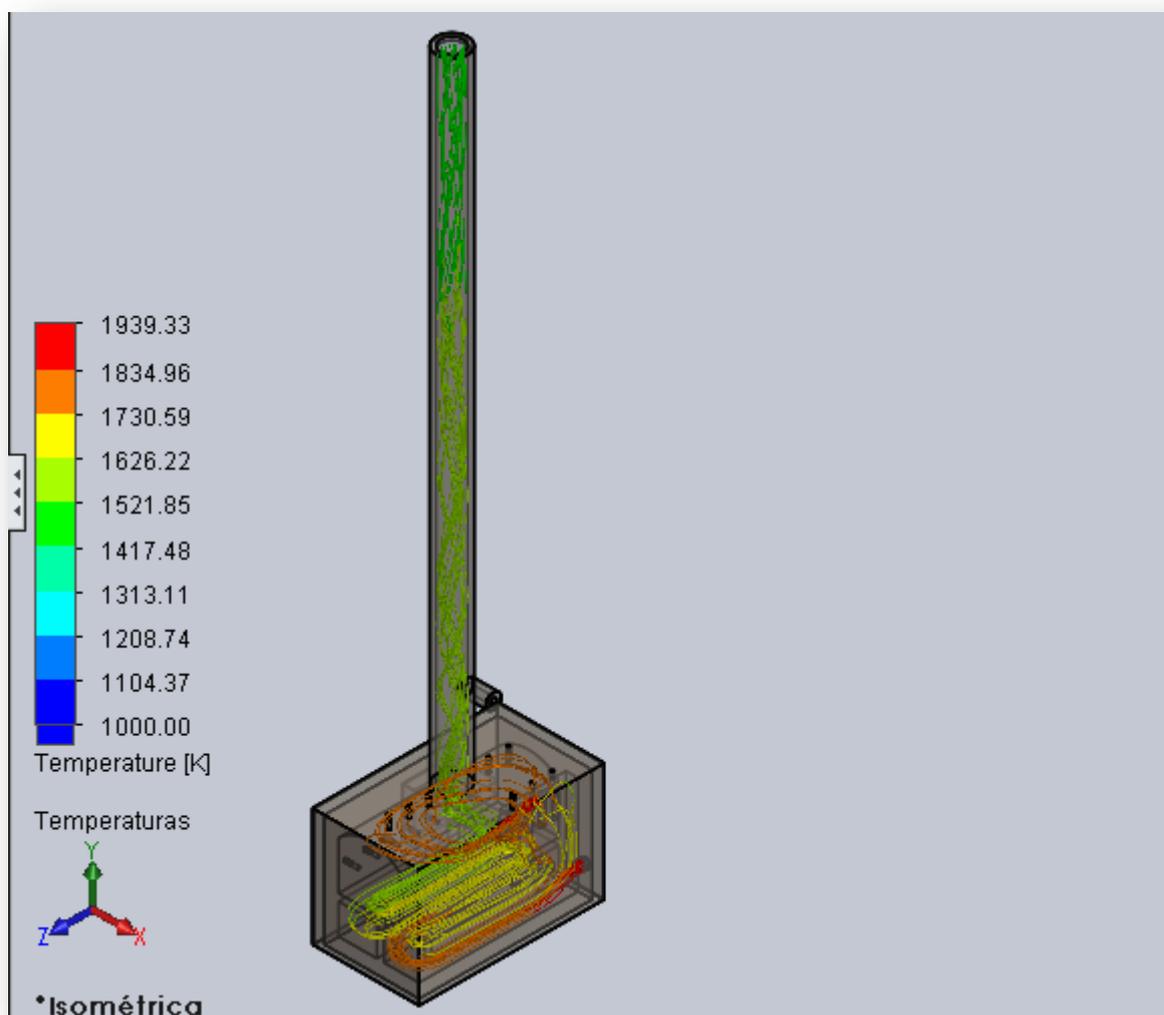
Para la modelización de la conducción se utilizan los mismos materiales que los mostrados en la Tabla 2. Para la radiación se añade a los materiales mostrados en la Tabla 3 un nuevo material, el aislante, de coeficiente de emisividad 0,7.

7.1 PRIMERA SIMULACIÓN

En esta primera simulación se procede igual que en las simulaciones de partida del horno, con la diferencia de que la condición de presión atmosférica se traslada desde la salida del horno hasta la salida de la chimenea.

Los flujos de entrada serán los máximos que puede proporcionar cada quemador: 0,2 kg/s y 0,1 kg/s. Las temperaturas y velocidades que se obtendrán serán superiores a las que realmente se darán en el horno, ya que los sistemas de control apagarán los quemadores cuando se superen los valores límite correspondientes.

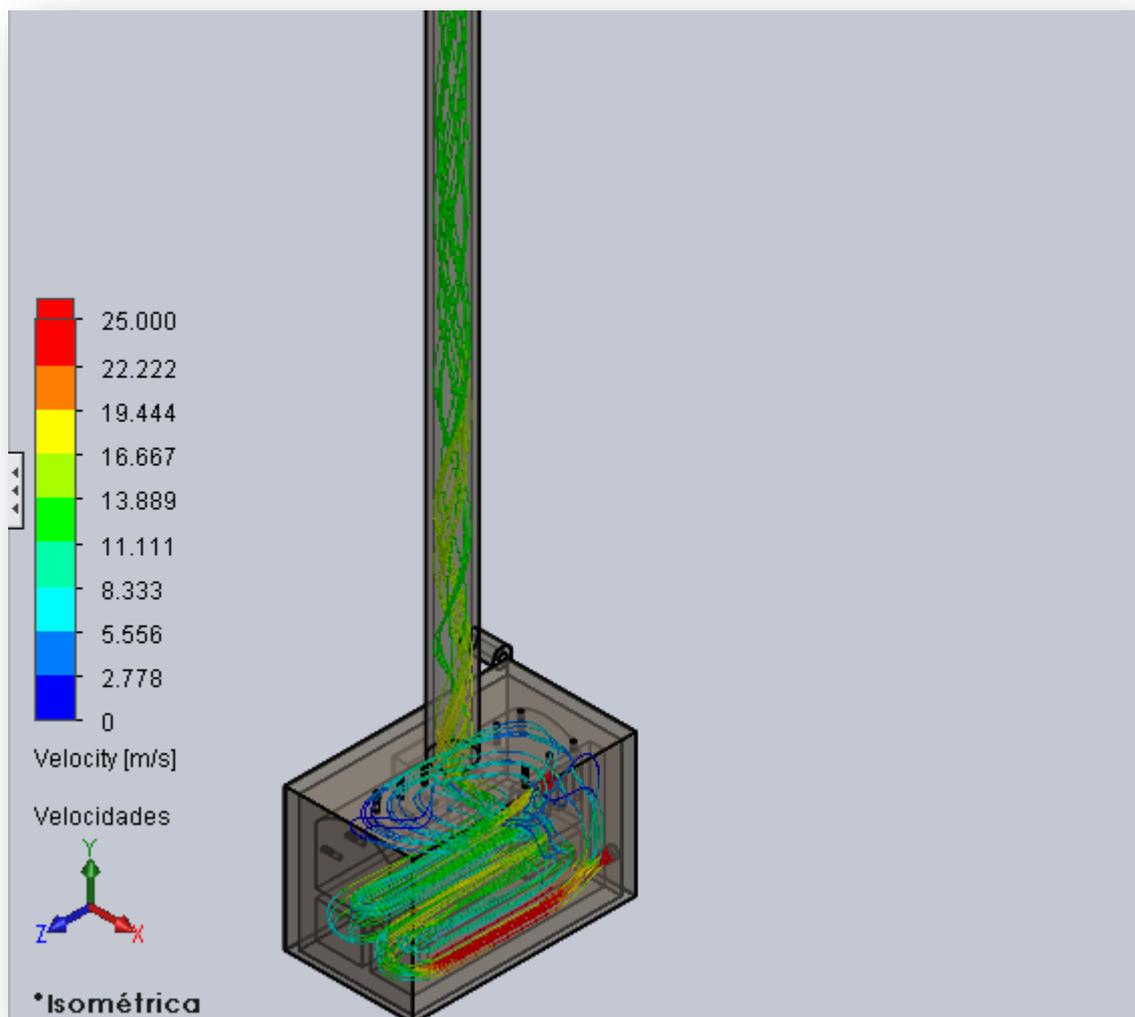
Una vez el programa ha llevado a cabo la simulación, la distribución de temperaturas de los gases obtenida es la siguiente:

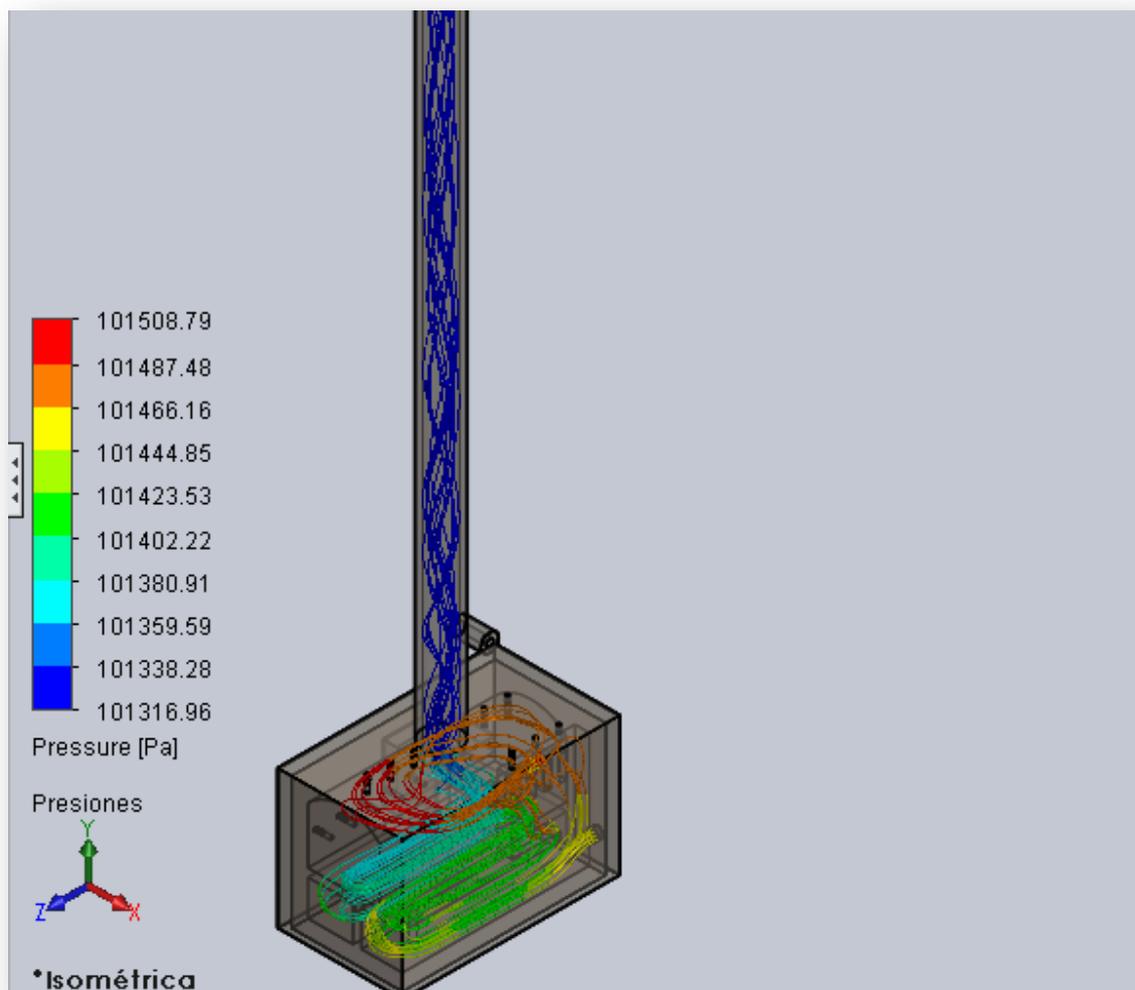


Como ya se ha comentado, las temperaturas demasiado elevadas no son un problema ya que los sistemas de control de horno se encargarán de detener los quemadores en el momento en el que superen los valores máximos.

Además, se puede apreciar como los gases en su ascensión por la chimenea no se introducen en el orificio de realimentación, ya que no se ha introducido ninguna condición de contorno en ese punto.

Las velocidades y presiones alcanzadas se muestran a continuación:





Las velocidades también superan los límites establecidos. En cuanto a las presiones, la caída de presión indica que el tiro natural es capaz de expulsar los gases por lo alto de la chimenea, por lo que no se necesita recurrir a un ventilador en la base de la chimenea para expulsar los gases.

7.2 SEGUNDA SIMULACIÓN

Se lleva a cabo una segunda simulación disminuyendo el caudal másico de los quemadores, para intentar una aproximación mayor a las condiciones reales de funcionamiento del horno. Se escoge un valor de 0,04 kg/s. El objetivo de esta simulación es comprobar que las temperaturas de las paredes de la chimenea cumplen con lo calculado en el apartado 5.4. Como no hay una manera de conseguir observar el calentamiento justo en el

momento adecuado, una solución es comparar las temperaturas alcanzadas en las paredes del horno y en las paredes de la chimenea en la simulación:

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes externas horno	K	298,49	325,18	307,44

Tabla 15.

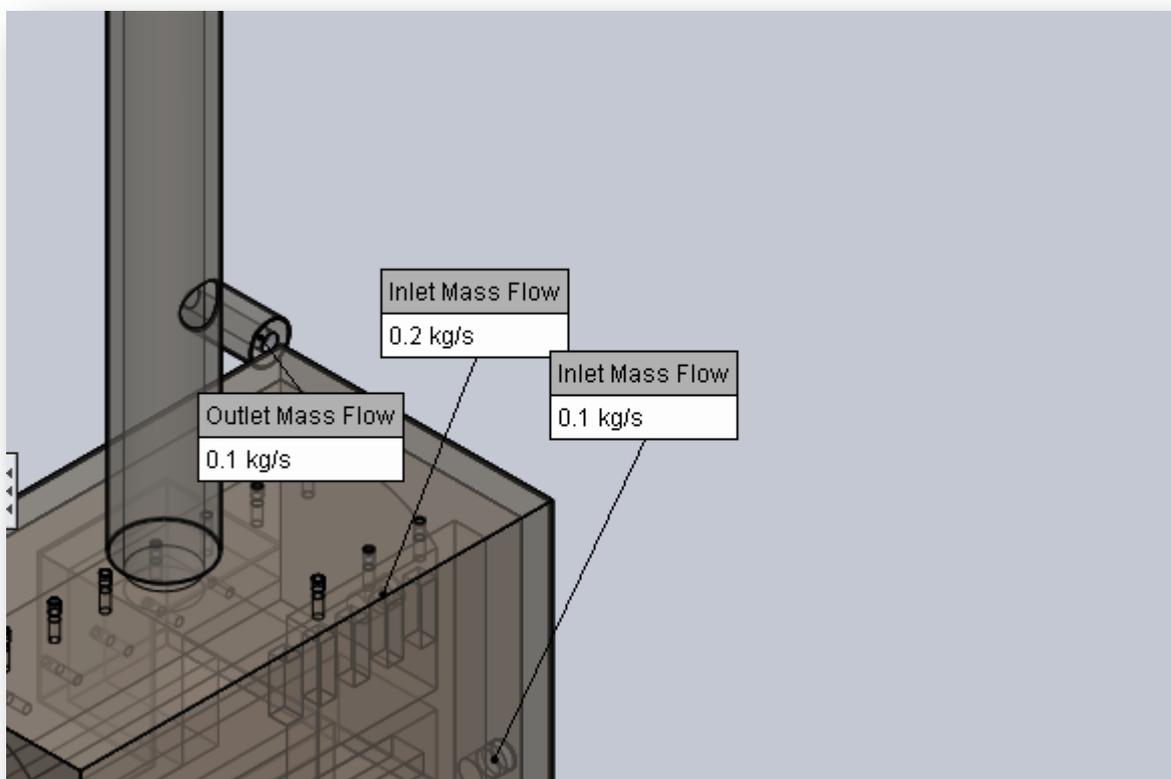
Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes externas chimenea	K	297,03	320,99	310,93

Tabla 16.

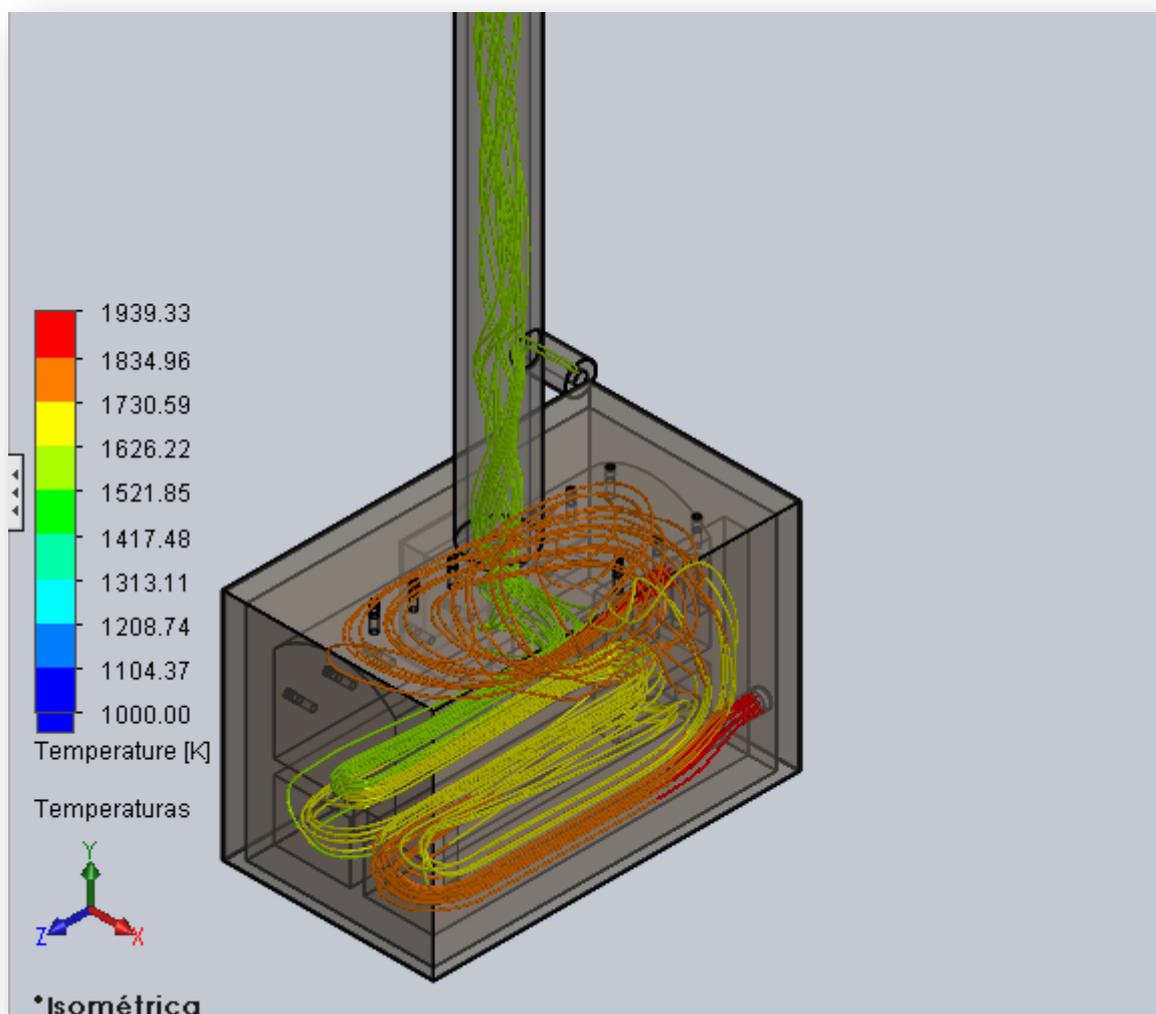
Se comprueba que en ningún caso se superan los 333 K, y que además el valor máximo de temperatura en el exterior de la chimenea es menor al valor máximo de temperatura en el exterior del horno, por lo que se concluye que la temperatura en el horno llegará antes al límite establecido, provocando el apagado de los quemadores antes de que la temperatura en la chimenea alcance el valor límite.

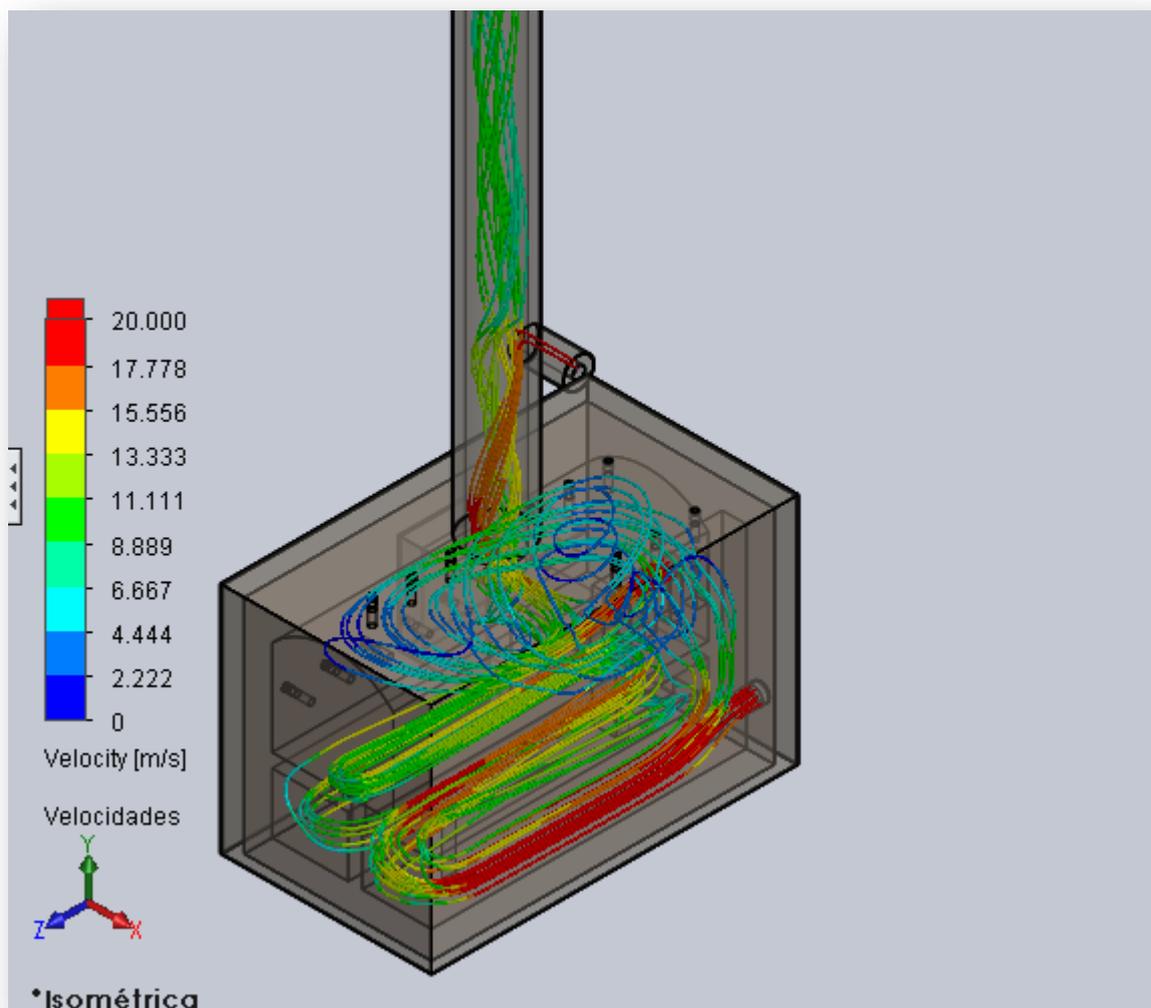
8 SIMULACIONES DE LA CHIMENEA CON REALIMENTACIÓN

La única diferencia con el apartado anterior es que se añade una cuarta condición de contorno: el flujo de salida por el orificio de la realimentación. Este flujo se configura de tal manera que un tercio del flujo que sale del horno sea realimentado por este conducto. Para ello, se recurre a un ventilador que genera la succión adecuada en cada caso, a partir de las lecturas que proporciona el caudalímetro en cada momento. El principal objetivo de este apartado es el dimensionamiento de ese ventilador. Pese a que el sistema de realimentación no funciona durante el proceso de calentamiento previo a la introducción del ataúd, se puede usar la simulación en la que el flujo másico es máximo (0,2 kg/s y 0,1 kg/s) para determinar la potencia máxima que se puede necesitar que aporte el ventilador. Al ser el flujo total de 0,3 kg/s se fija la condición de contorno del flujo de salida en 0,1 kg/s.

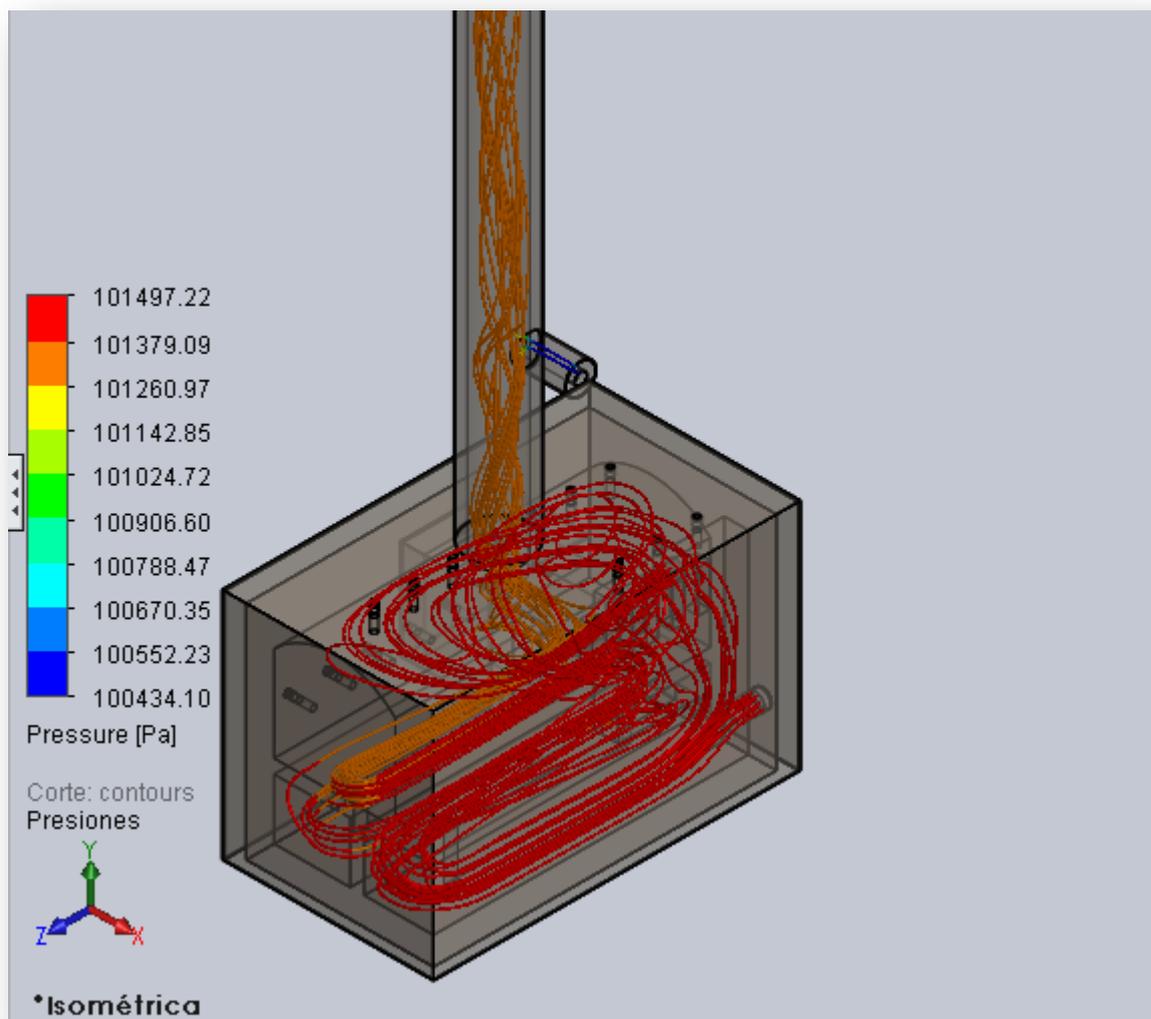


Una vez llevado a cabo el análisis por el programa, se obtiene las siguientes distribuciones de temperaturas y velocidades:

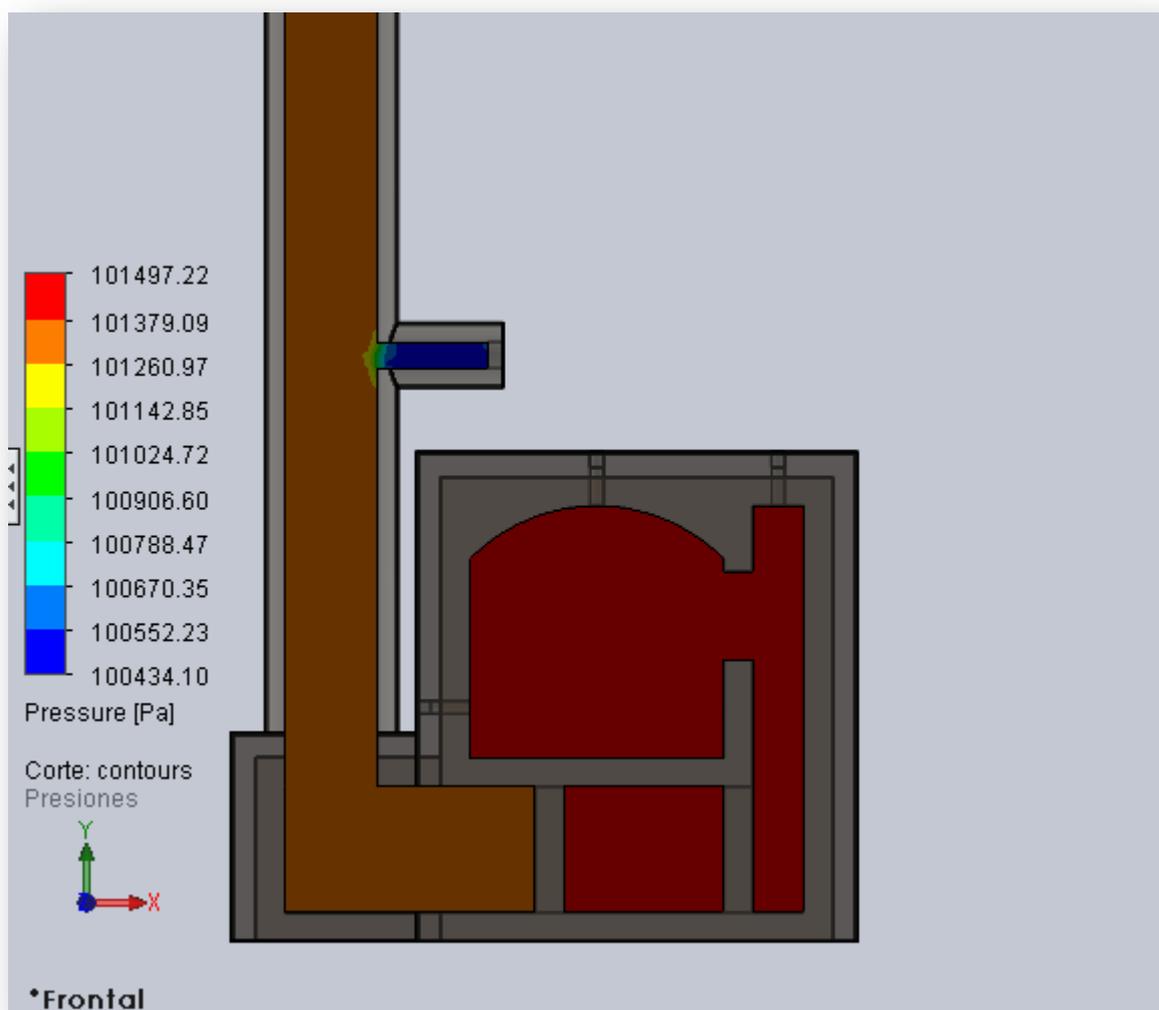




Se observa que ahora el flujo sí que pasa por el orificio de realimentación, ya que se ha añadido la condición de flujo másico. El gas sufre una gran aceleración al penetrar en el conducto. Se obtiene la distribución de presiones para determinar la caída de presión que se produce:



La caída de presión es notable si se compara con los resultados obtenidos anteriormente:



Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Presión en entrada quemador principal	Pa	101540,07	101544,13	101541,53	101541,53

Tabla 17.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Presión salida chimenea	Pa	101325	101325	101325	101325

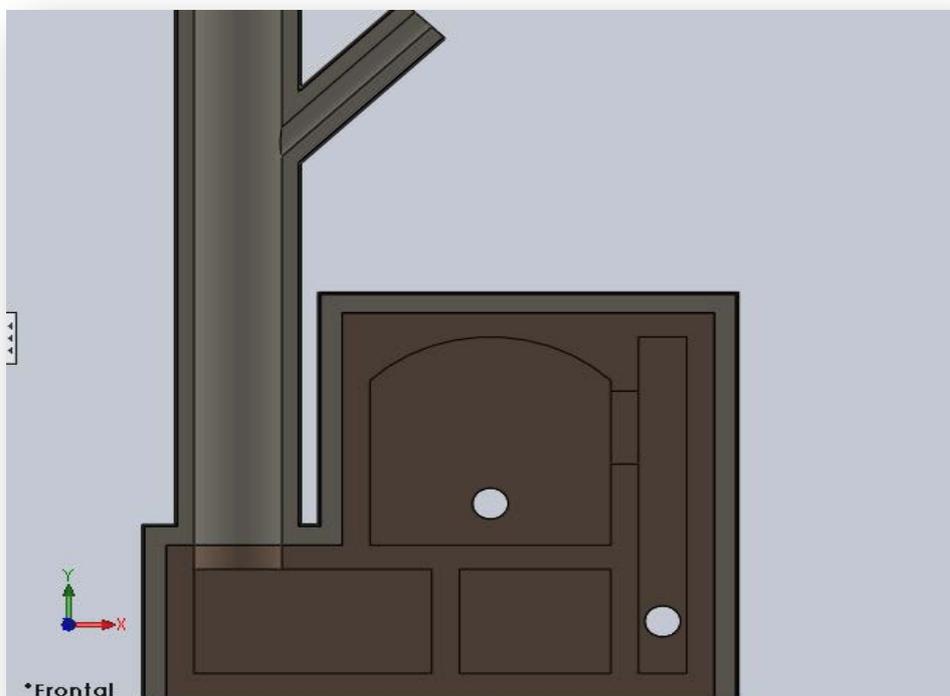
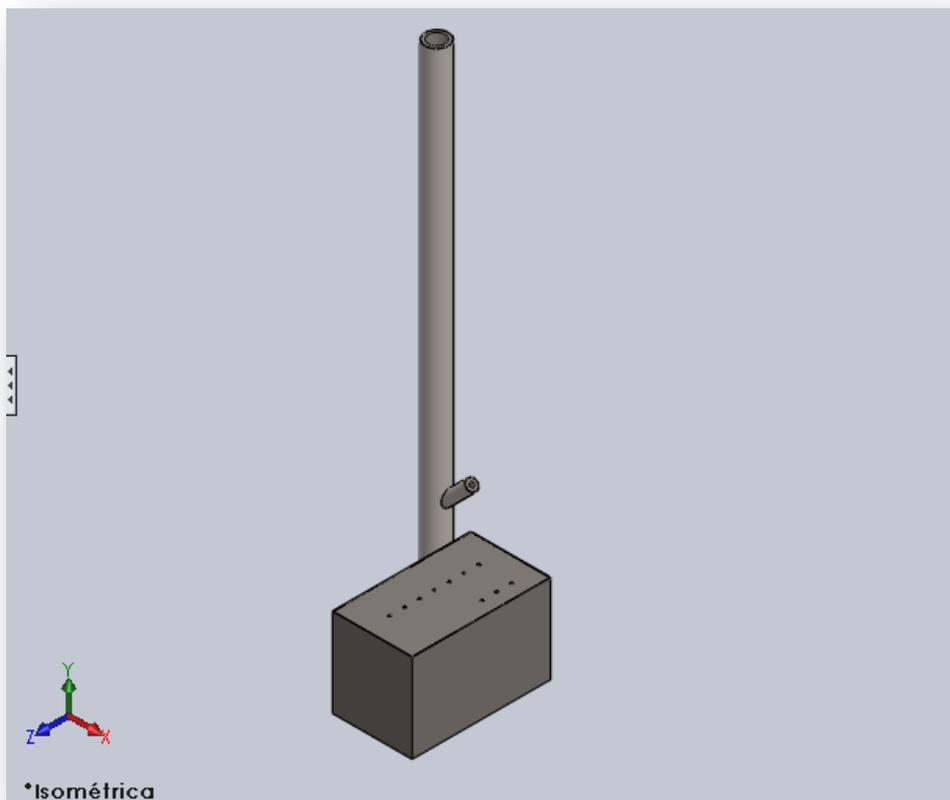
Tabla 18.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Presión salida conducto realimentación	Pa	100446,35	100501,36	100468,1	100468,1

Tabla 19.

La diferencia llega a ser de 1093,72 Pa Si comparamos los valores medios a la entrada del horno y a la salida de la realimentación. Dado que cuanto mayor sea esta diferencia mayor será el ventilador necesario, interesa hacer una corrección del diseño, buscando minimizar la diferencia. En concreto, lo que se hace es inclinar el conducto de realimentación 45°.

Una vez hecha esta modificación, la pieza queda así:



Una vez llevada a cabo la simulación, se comparan los valores exactos de las presiones a la salida de la realimentación en ambas simulaciones:

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Presión realimentación 90°	Pa	100446,35	100501,36	100468,1	100468,1

Tabla 20.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	<i>Bulk average</i>
Presión realimentación 45°	Pa	100521,65	100628,66	100557,01	100556,75

Tabla 21.

Luego la modificación realizada en la chimenea permite reducir en 88,65 Pa la caída de presión.

Dado que el ángulo de 45° reduce la potencia del ventilador a instalar, se adopta esta modificación en el modelo final del horno.

9 CÁLCULOS DE LOS VENTILADORES

9.1 VENTILADOR DE REALIMENTACIÓN

Para calcular la potencia que el ventilador debe proporcionar a los gases, se utiliza la fórmula siguiente:

$$P_{desarrollada} = \dot{m} \times H \times g$$

Donde:

- $P_{desarrollada}$ es la potencia desarrollada por el ventilador, en W.
- \dot{m} es el flujo másico que atraviesa el ventilador, en kg/s.
- H es la presión que ha de vencer el ventilador cuando funciona, en metros de columna de los gases de combustión.
- g es el valor de la gravedad que se tomará de $9,81 \text{ m/s}^2$.

\dot{m} ya es conocido:

$$\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$$

Para obtener H se recurre a la siguiente fórmula:

$$P = \rho \times g \times H$$

En la que:

- P es la presión en Pa.
- ρ es la densidad de los gases en kg/m^3 .
- g es de nuevo el valor de la gravedad.
- H es la altura de la columna de gas, en m.

El valor de P es la diferencia de presiones entre el conducto de realimentación y el interior del horno. Recurriendo a los resultados de la última simulación, se tiene que las presiones en las entradas de cada uno de los quemadores son (*bulk average*): 101486,55 Pa en el principal y 101449,10 Pa en el secundario. Se toman el valor mayor, por lo que la caída de presión es:

$$P = 101486,55 - 100556,75 = 929,8Pa$$

La densidad del gas depende de la temperatura, por lo que para una mayor precisión se toma justo su valor en el conducto de realimentación:

$$d = 0,22 \text{ kg/m}^3$$

El valor de la columna de gas es:

$$H = \frac{P}{\rho \times g}$$

$$H = \frac{929,8}{0,22 \times 9,81} = 430,82m$$

La potencia que necesita desarrollar el ventilador para vencer esta diferencia de presiones es:

$$P_{desarrollada} = 0,1 \times 430,82 \times 9,81 = 422,64W$$

La potencia que desarrolla un ventilador está relacionada con la potencia absorbida por el mismo a través del rendimiento del ventilador:

$$\eta = \frac{P_{desarrollada}}{P_{absorbida}}$$

Suponiendo un rendimiento del 75% la potencia absorbida es:

$$P_{absorbida} = \frac{P_{desarrollada}}{\eta}$$

$$P_{absorbida} = \frac{422,64}{0,75} = 563,52W = 0,56kW$$

Por lo que el ventilador del conducto de realimentación debe tener una potencia de 0,56 kW con un rendimiento del 75 %.

9.2 VENTILADOR DE AIRE AMBIENTE

Siguiendo los mismos pasos se procede a dimensionar el ventilador que aspira aire del ambiente que se mezcla con los gases aspirados por el ventilador del anterior apartado para finalmente introducirse durante la cremación en las cámaras del horno por los conductos practicados a tal efecto.

Se escoge para este ventilador el mismo flujo másico que para el anterior. Los datos de presiones necesarios se toman de los resultados de la última simulación:

$$\dot{m} = 0,1 \text{ kg/s}$$

$$P = 101486,55 - 101325 = 161,55 \text{ Pa}$$

$$d = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

La altura es:

$$H = \frac{161,55}{1,29 \times 9,81} = 12,77 \text{ m}$$

La potencia que necesita desarrollar el ventilador es:

$$P_{desarrollada} = 0,1 \times 12,77 \times 9,81 = 12,53 \text{ W}$$

Suponiendo el mismo rendimiento que en el caso anterior, se obtiene que la potencia absorbida ha de ser la siguiente:

$$P_{absorbida} = \frac{12,53}{0,75} = 16,71 \text{ W} = 0,016 \text{ kW}$$

9.3 VENTILADORES DE LOS QUEMADORES

Los quemadores deben tener un ventilador integrado de forma que los productos de la combustión sean impulsados dentro del horno. El procedimiento para calcular la potencia de estos quemadores es análogo a los anteriores.

Para el quemador principal:

$$\dot{m}_1 = 0,2 \text{ kg/s}$$

$$P_1 = 101486,55 - 101325 = 161,55 \text{ Pa}$$

$$d = 0,18 \text{ kg/m}^3$$

$$H_1 = \frac{161,55}{0,18 \times 9,81} = 91,49 \text{ m}$$

$$P_{desarrollada1} = 0,2 \times 91,49 \times 9,81 = 179,5 \text{ W}$$

$$P_{absorbida1} = \frac{179,5}{0,75} = 239,34W = 0,24kW$$

Para el quemador secundario:

$$\dot{m}_2 = 0,1 \text{ kg/s}$$

$$P_2 = 101449,1 - 101325 = 124,1Pa$$

$$d = 0,18 \text{ kg/m}^3$$

$$H_2 = \frac{124,1}{0,18 \times 9,81} = 70,28m$$

$$P_{desarrollada2} = 0,1 \times 70,28 \times 9,81 = 68,94W$$

$$P_{absorbida2} = \frac{68,94}{0,75} = 91,93W = 0,092kW$$

10 MÉTODOS DE CONTROL

Una vez que se ha diseñado el modelo definitivo del horno junto con la chimenea, se procede a añadir los sistemas de control requeridos. Como ya se justificó anteriormente, se instalan dos quemadores, uno de 290 kW y el otro de 145 kW de potencia. Si se dejan funcionar estos quemadores hasta llegar al estado estacionario, la temperatura en el interior del horno es superior a la temperatura límite que se utilizó para dimensionar los muros del horno. Además, la velocidad de los gases en la cámara secundaria es tan elevada que estos permanecen menos de dos segundos en la misma.

Es necesario por lo tanto implementar dos métodos de control individuales: uno de temperatura y otro de velocidad.

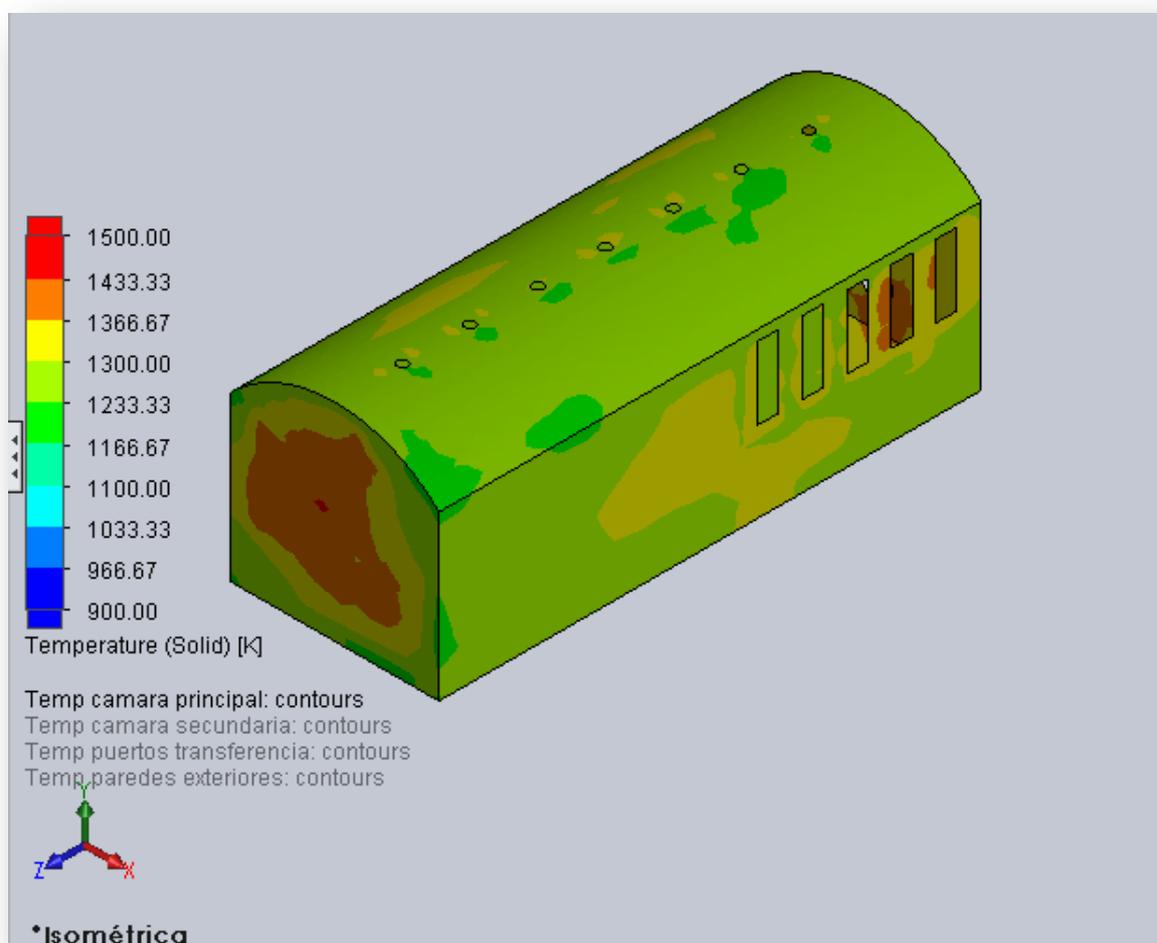
10.1 CONTROL DE TEMPERATURA

El control de la temperatura consiste en lo siguiente: dos termopares estratégicamente situados en las zonas más calientes de las paredes de la cámara principal y secundaria miden continuamente la temperatura y, en el caso de que se supere la temperatura máxima de 1096°C en una de las paredes, apagan el quemador correspondiente. La temperatura disminuirá entonces, encendiéndose de nuevo el quemador cuando los termopares detecten que la temperatura cae por debajo de 850°C.

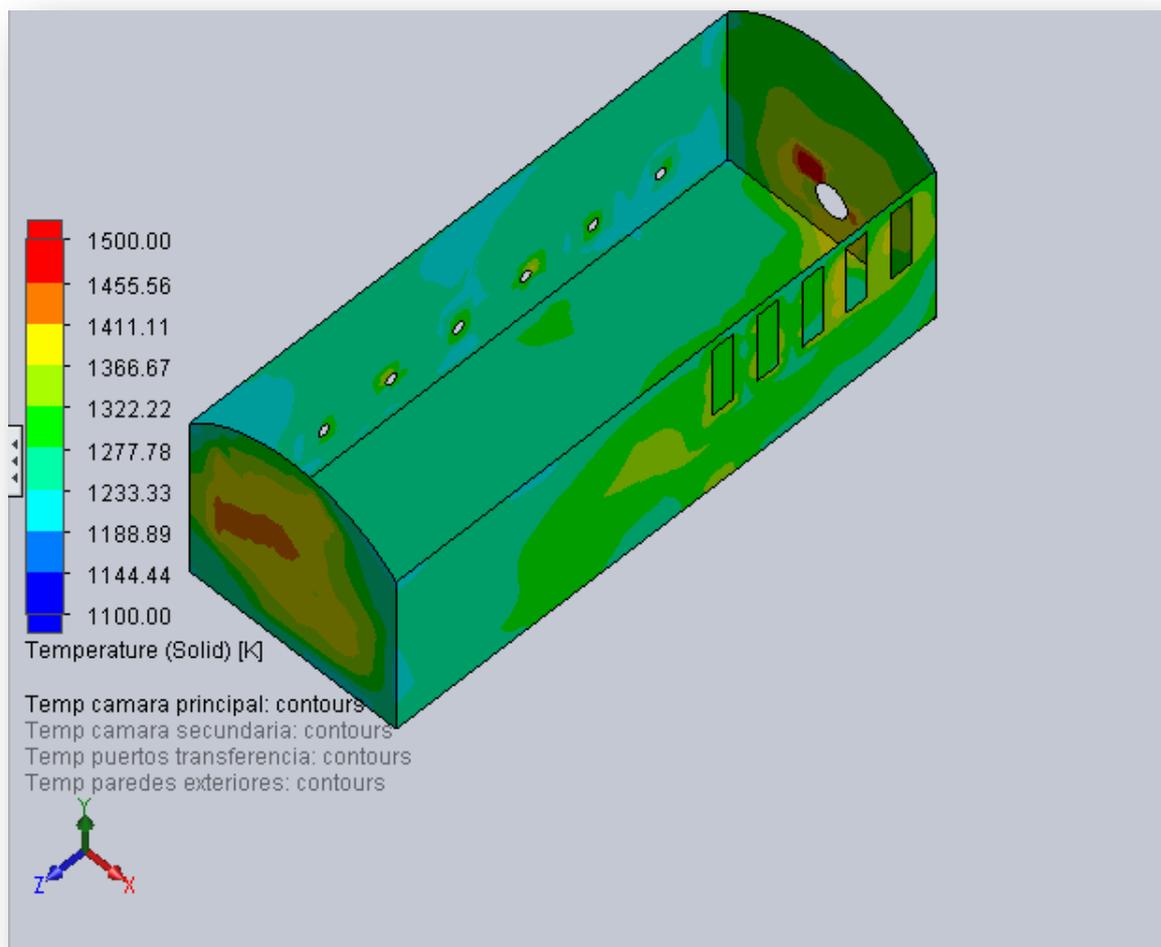
Es necesario tomar unas tolerancias de por ejemplo $\pm 10^{\circ}\text{C}$ en las mediciones de los termopares para evitar que las temperaturas salgan del intervalo deseado debido al retardo del método de control, ya que el enfriamiento o calentamiento de los gases no es inmediato. Así, si uno de los termopares detecta que la temperatura asciende hasta los 1086°C, se apagaría el quemador correspondiente de forma inmediata. En lo que respecta a la temperatura mínima, puede ser necesario tomar una tolerancia mucho mayor, como se explicará más adelante.

El principal problema en lo que atañe al diseño es elegir donde emplazar los termopares. Para ello, se deben analizar los resultados obtenidos e identificar donde se encuentran las temperaturas más altas en las paredes de la cámara principal y secundaria.

Para el análisis, se repite la simulación en la pieza final sin realimentación y con el flujo máximo saliendo por los quemadores. En primer lugar se van a analizar las temperaturas que alcanzan las paredes de la cámara principal una vez se ha alcanzado el estado estacionario. Para ello se toma la siguiente captura:



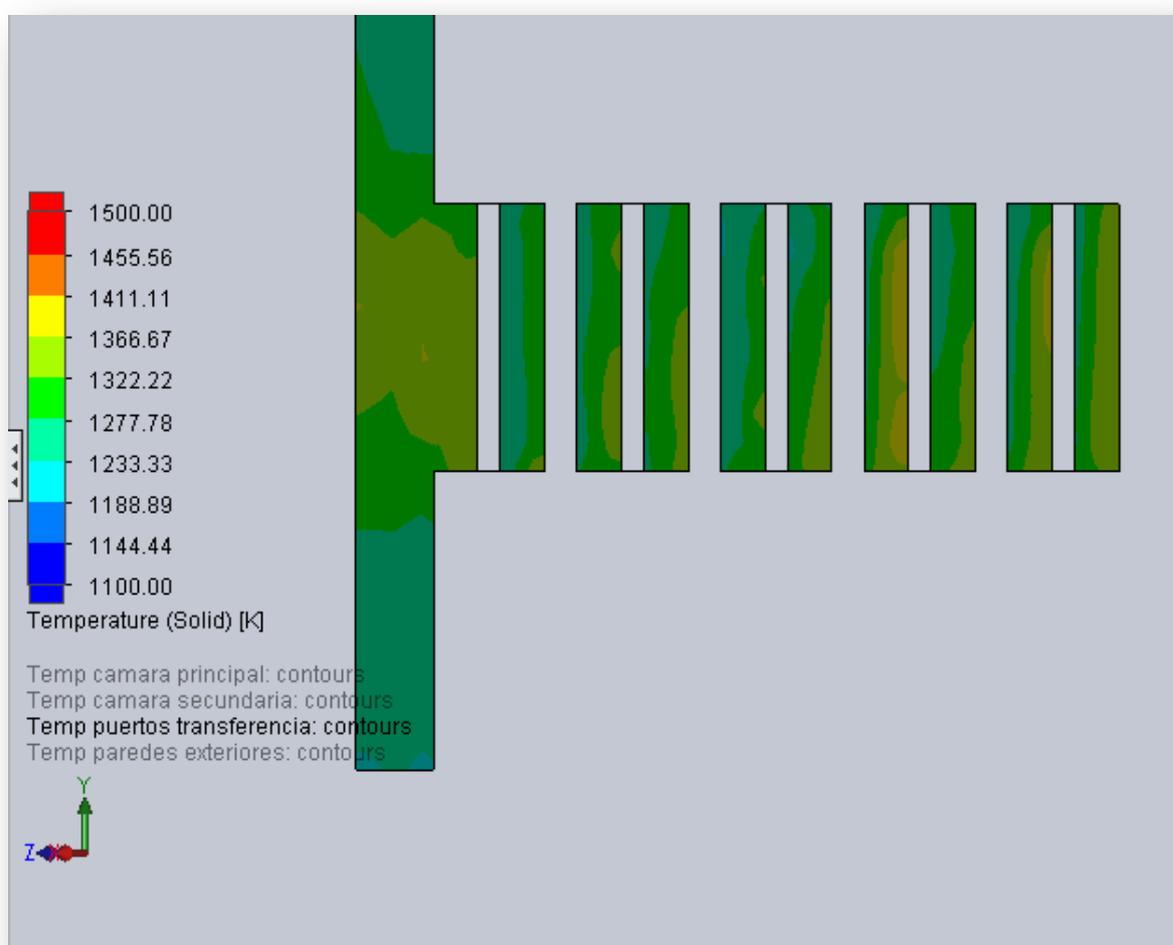
Se ajusta más la escala y se oculta la superficie superior para poder apreciar con mayor precisión las temperaturas más elevadas:



Las temperaturas más elevadas se alcanzan en una pequeña región de los puertos de transferencia, y especialmente en los alrededores del quemador y en el extremo opuesto al quemador, donde se sitúa la puerta del horno.

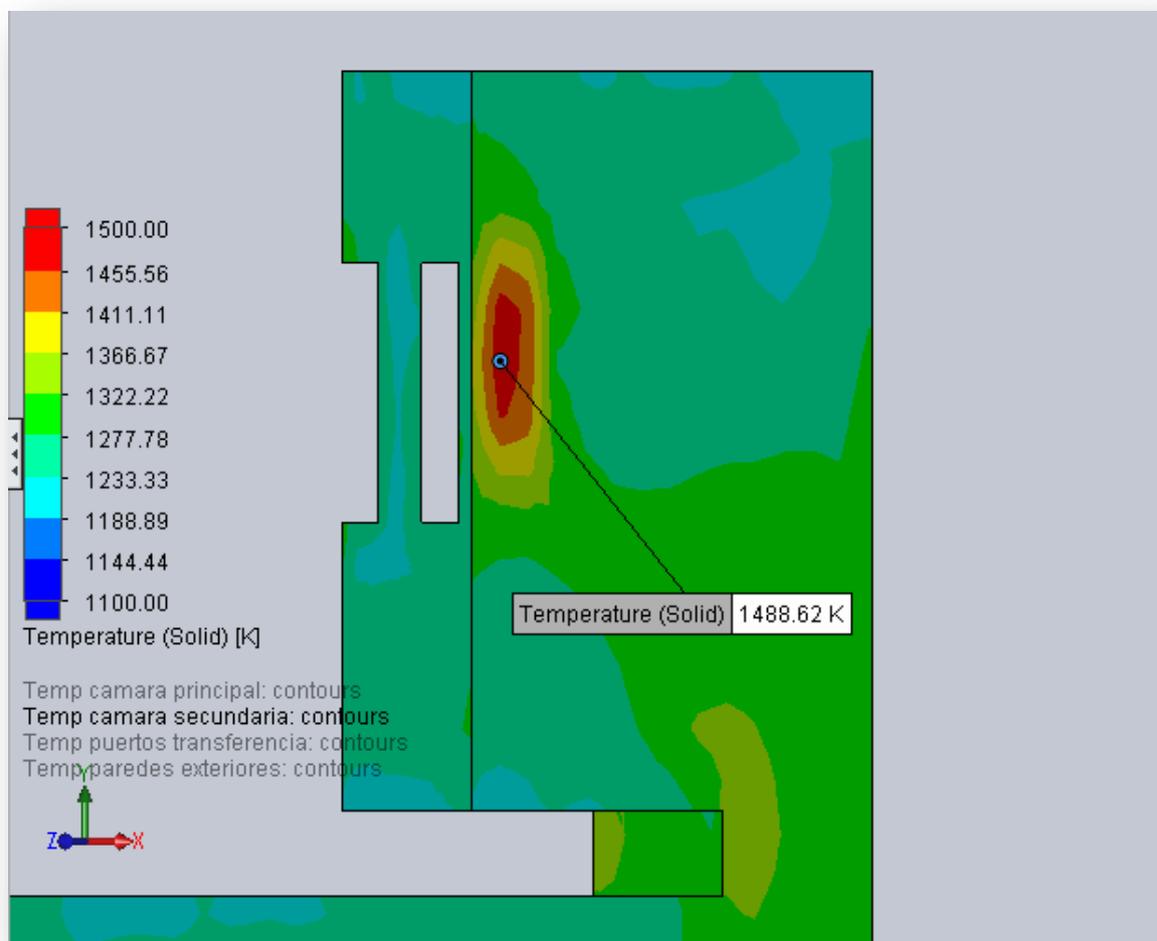
La zona alrededor del quemador no es adecuada ya que se puede exponer el termopar al fuego durante el proceso de cremación. Este problema aparece también en la puerta del horno, por lo que a priori tampoco parece el lugar indicado. Además, hay que tener en cuenta que el método de control también deberá funcionar durante el proceso de cremación, cuando el ataúd se encuentra dentro de la cámara, y no solo durante el proceso de calentamiento como en esta simulación. La presencia del ataúd y la combustión del mismo podrían desviar la trayectoria de los gases, existiendo entonces una distribución de temperaturas completamente distinta. El

ataúd actuará como un obstáculo impidiendo a los gases procedentes del quemador incidir de forma directa sobre la puerta. Pero aún en ese caso, todos los gases han de pasar por los puertos de transferencia, por lo que se puede deducir que las temperaturas elevadas en esa región se mantendrán durante todo el ciclo de funcionamiento, siendo este el emplazamiento idóneo para el termopar de la cámara principal. No obstante, las temperaturas observadas alrededor de los puertos de transferencia no resultan tan elevadas, por lo que se analiza el interior de los orificios por si allí se dieran temperaturas más altas:



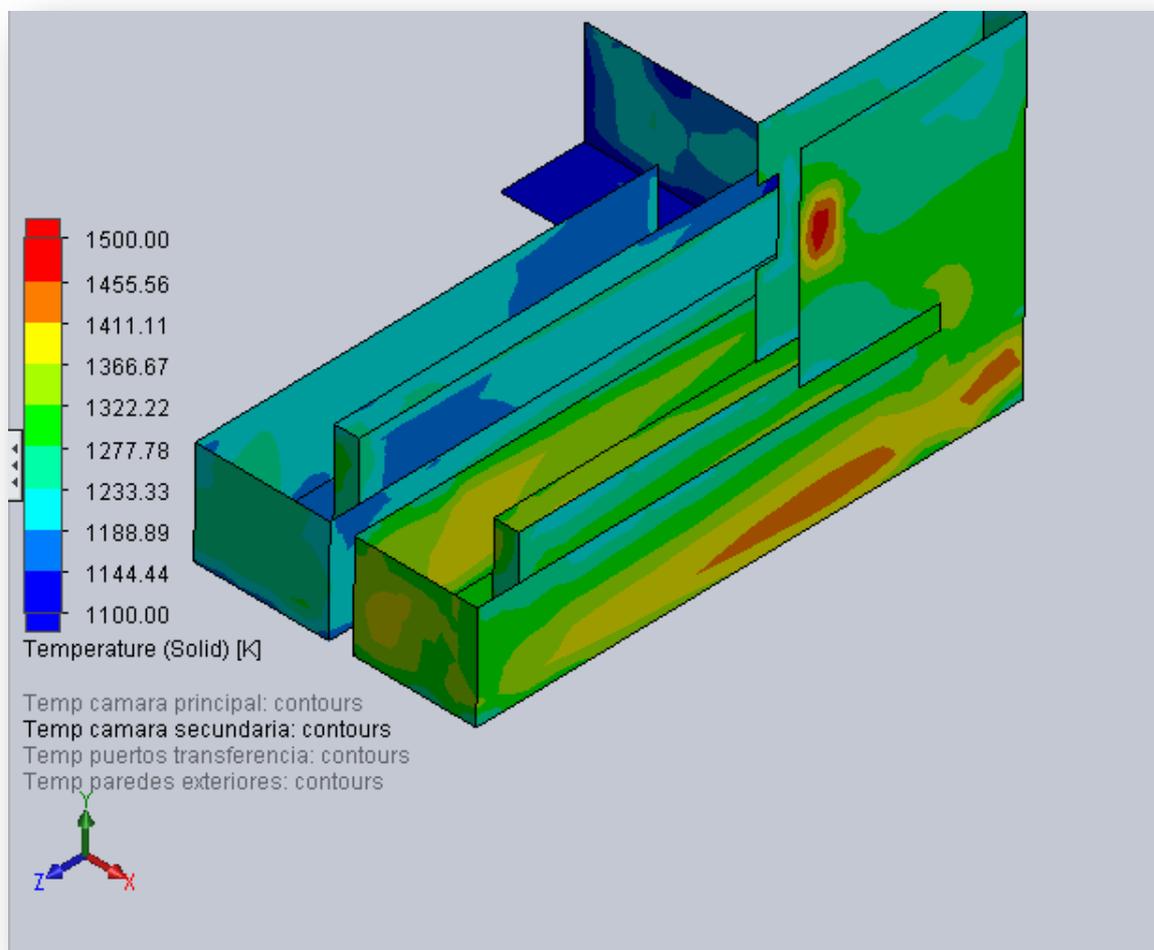
Se observa que las temperaturas que alcanzan las paredes no son tan elevadas como dentro de la cámara principal, por lo que se descarta este emplazamiento. Como última alternativa, se analizan las temperaturas que se dan en el paso superior de la cámara secundaria, ya que las tem-

peraturas de las paredes en esta región son debidas únicamente al calor procedente de la cámara secundaria, ya que la influencia del quemador secundario no aparece sino hasta el primer paso inferior:

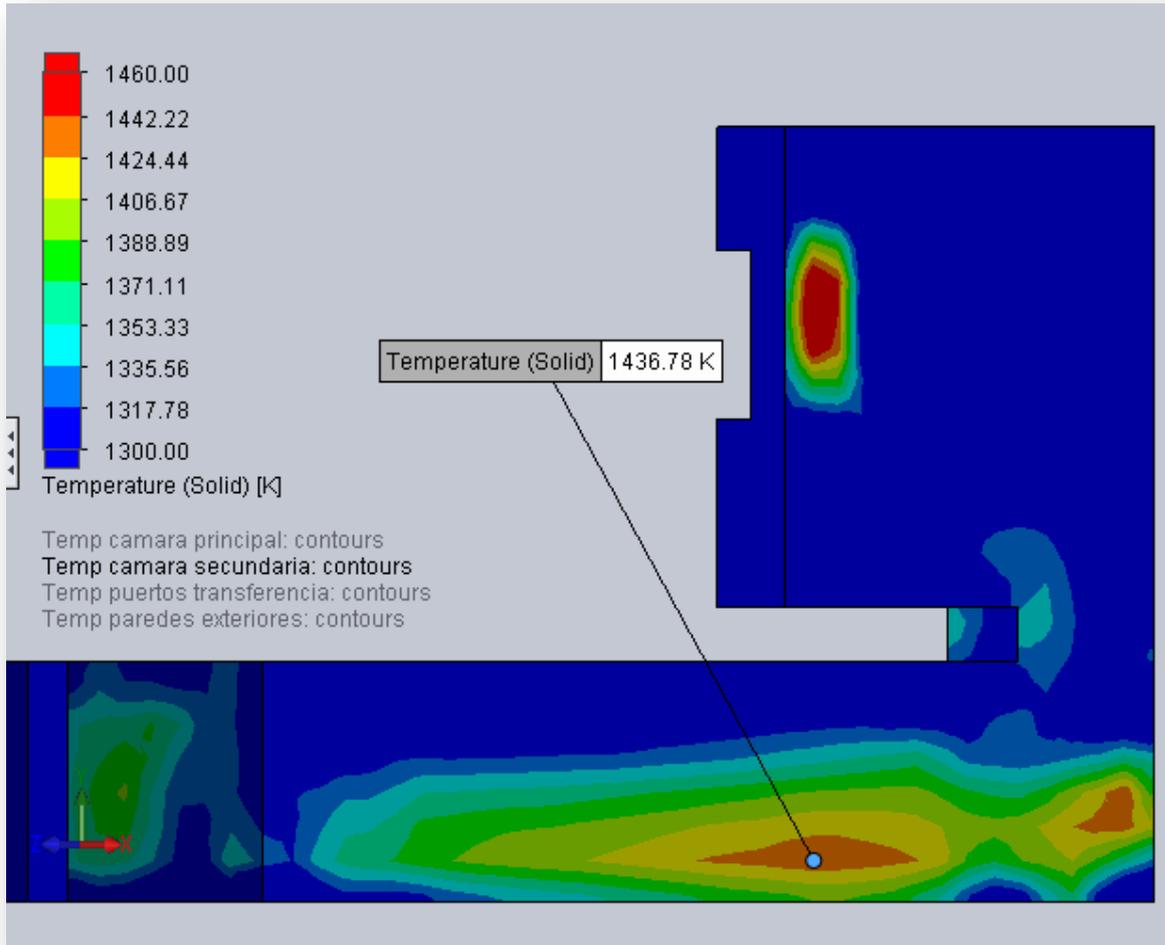


Justo enfrente del paso más alejado del quemador la pared alcanza temperaturas incluso más elevadas que las observadas en la cámara principal. Se concluye que este es el emplazamiento idóneo para el termopar de la cámara principal, ya que en este punto se alcanzan las temperaturas más elevadas y, además, se trata de una zona que se encontrará a altas temperaturas durante todo el proceso y a salvo de la acción directa del fuego. Concretamente, se sitúa el termopar a una altura de 60 cm con respecto a la base del paso superior, y a una distancia de 95 cm de la pared donde se encuentra acoplado el quemador secundario.

El siguiente paso es decidir donde emplazar el termopar de la cámara secundaria, para lo cual se analizan las temperaturas de las paredes en la misma:



Las temperaturas más altas se alcanzan en el primer y en el segundo paso inferior. No obstante, las proximidades del quemador no son un lugar adecuado para situar el termopar, ya que se encuentra bajo la acción directa de la llama. Se ajusta la escala para apreciar mejor la distribución de temperaturas y encontrar un emplazamiento lo más alejado posible del quemador:



Como no existe otra alternativa, se sitúa el quemador en el primer paso inferior de la cámara secundaria, pero lo más alejado posible del quemador. Se coloca a una altura de 10 cm respecto a la base de los pasos inferiores, y a una distancia de 100 cm del quemador, en la pared más próxima al muro exterior.

Finalmente, hay que tener en consideración que al colocarse los termopares en los puntos más calientes, estos serán los últimos puntos de todas las paredes en detectar que la temperatura ha caído por debajo del límite. Además, mientras que la condición de temperatura máxima se refiere a las paredes, la de temperatura mínima se refiere a los gases. Por todo esto, la tolerancia deberá ser mayor que la definida para la temperatura máxima. Observando que la diferencia de temperaturas en las capturas anteriores varía en torno a unos 100 grados del punto más caliente al

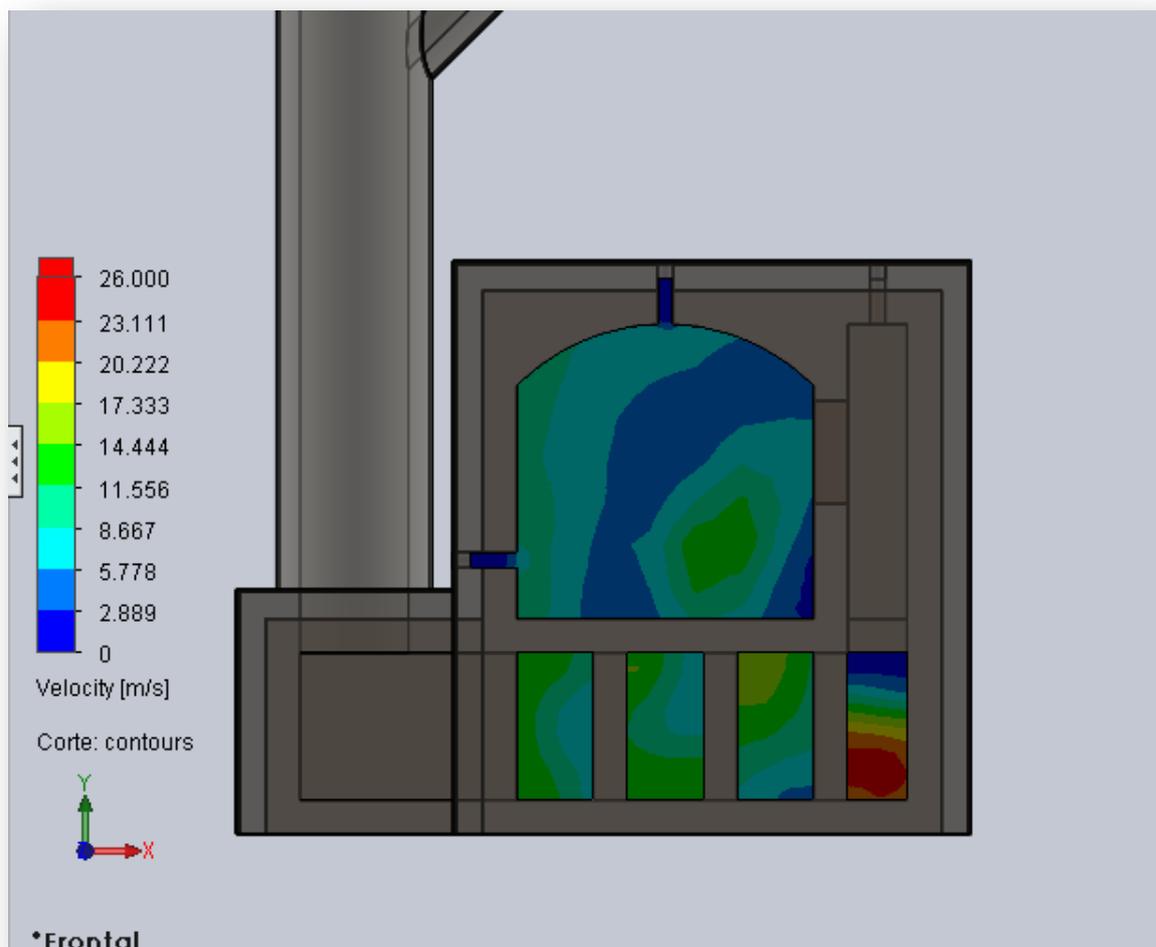
más frío, se define la temperatura mínima que hará mandar la orden de encendido de los quemadores en 960°C.

10.2 CONTROL DE VELOCIDAD

El control de la velocidad de los gases de combustión en la cámara secundaria es necesario para asegurar el cumplimiento de lo especificado en el Real Decreto 816/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. Según este reglamento, los gases de combustión deberán permanecer en la cámara secundaria al menos dos segundos a una temperatura mínima de 850°C.

La condición de temperatura se cumple gracias al control de temperatura definido en el apartado anterior, pero se debe añadir un nuevo control: el de velocidad. Dado que la longitud de cada paso de la cámara secundaria es de 2,6 metros y que hay cuatro pasos; los gases deberán recorrer 10,4 metros antes de salir del horno hacia la chimenea. Una sencilla división indica que la velocidad media de los mismos debe ser inferior a 5,2 m/s si se quiere que tarde más de dos segundos en recorrer los cuatro pasos.

Sin embargo, la velocidad en la cámara secundaria no es uniforme, sino que es mayor en el primer paso y a partir de ahí va disminuyendo hasta alcanzar los valores más pequeños a la salida del horno. Si se vuelve atrás al sub-apartado 4.5.2 se puede ver cómo además estas velocidades son mayores cuanto más nos alejamos de los extremos de cada paso. Por ello se realiza un corte que nos muestra las velocidades en la sección intermedia de los pasos:



La velocidad media toma valores similares en todos los pasos menos el primero, donde se alcanzan valores muy superiores al resto, aunque en el segundo paso las velocidades son aún elevadas comparadas con los dos últimos. Se decide que la medición de la velocidad se llevará a cabo justo en la salida del horno. La razón es doble: por un lado, se observa que la velocidad media en los tres últimos pasos no es muy superior a la velocidad a la salida del horno que se muestra en la *Tabla 13* (9,82 m/s). Por el otro, la medición de la velocidad se lleva a cabo con un caudalímetro o medidor de caudal, el cual nos proporciona el valor del caudal que atraviesa una sección determinada. Como se conoce la sección, la obtención de la velocidad es directa. Pero estos aparatos son sensibles a la temperatura, y cuanto más cerca del quemador se sitúe mayor será su coste.

El caudalímetro se situará pues justo en el límite entre el horno y la chimenea. Se configurará el Controlador Lógico Programable de manera que cuando la velocidad a la salida del horno sea mayor a 3,9 m/s ambos quemadores se apaguen. De esta manera la velocidad disminuirá rápidamente. Se toma el valor límite de 3,9 m/s porque a esa velocidad los gases tardan 2 segundos en recorrer los 7,8 m de longitud que tienen en total los tres últimos pasos. Así, no se depende de la velocidad en el primer paso inferior para cumplir el requisito de permanencia.

Los quemadores se volverán a encender si pasado un cierto tiempo las temperaturas caen por debajo del límite establecido en el apartado anterior, ya que entonces actúa el control de temperatura.

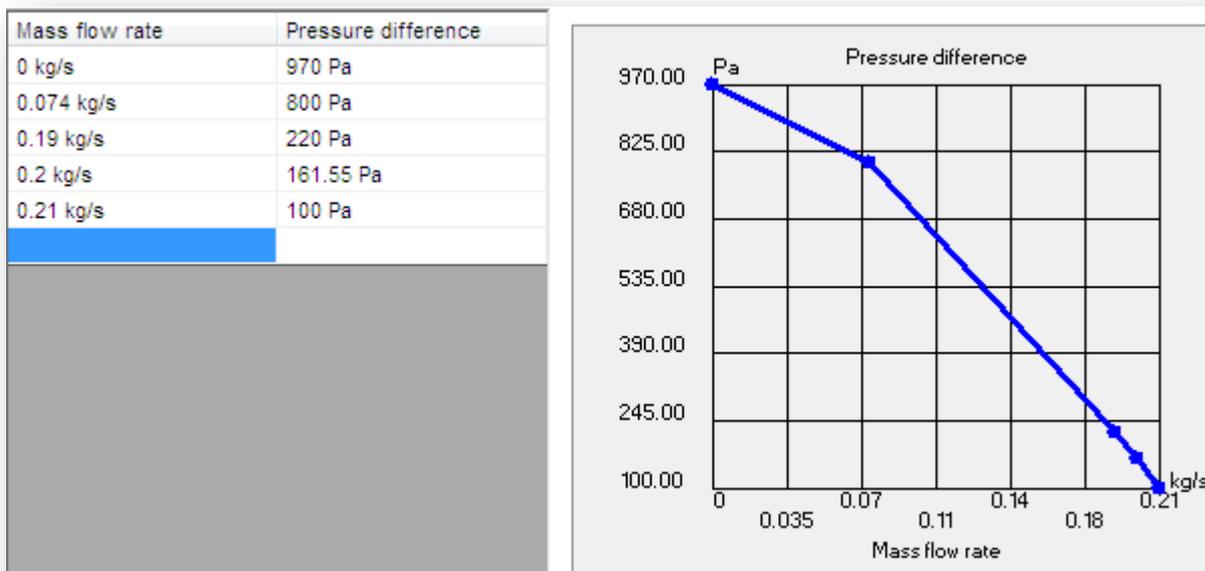
11 SIMULACIONES DEL CALENTAMIENTO DEL HORNO

Para simular el proceso de calentamiento del horno se ha de llevar a cabo un análisis transitorio, al contrario que en todas las simulaciones anteriores donde el análisis era estacionario. De esta manera se puede ver como el interior y las paredes del horno se van calentando con el paso del tiempo a partir de un instante inicial en el que todo el conjunto está a temperatura ambiente.

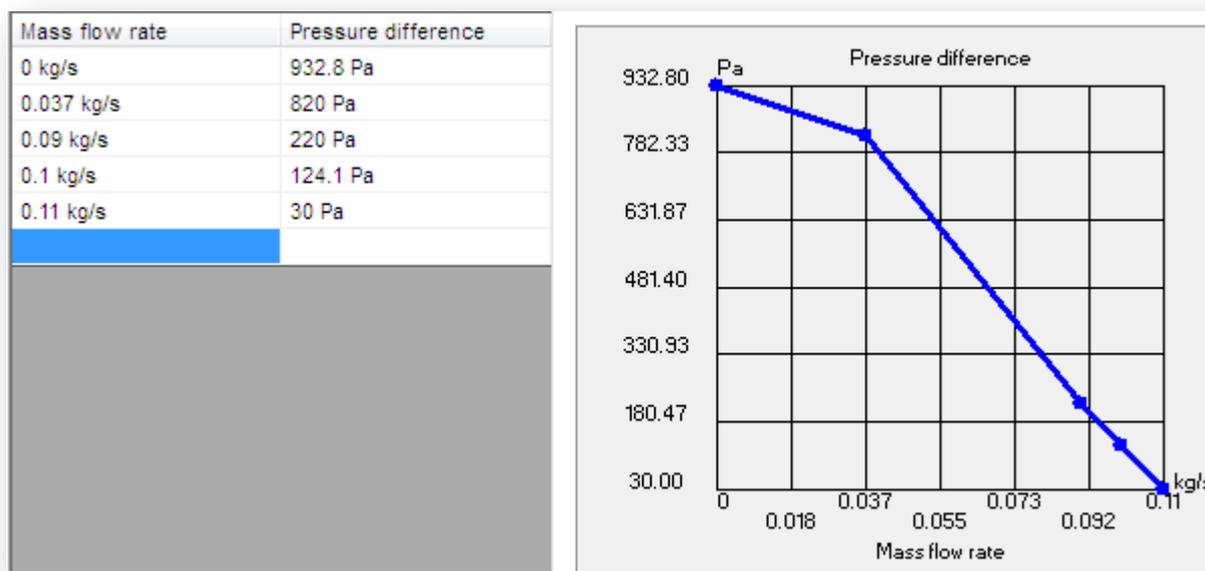
Además, en este análisis transitorio se van a implementar los sistemas de control del apartado anterior. Para ello se emplea una herramienta de *Flow Simulation* denominada *Toggle*. Esta herramienta permite “encender” o “apagar” los flujos de entrada cuando se cumple una condición definida previamente por el usuario. No obstante, solo permite definir una condición por flujo, por lo que resulta imposible implementar en la misma simulación ambos controles, habiendo pues que realizar más de una simulación si se quieren analizar los dos sistemas.

Otro inconveniente es que estas condiciones no se pueden aplicar a flujos másicos simples como los definidos anteriormente, sino que es necesario definir los flujos de entrada a través de ventiladores (*fans* en el programa). Se definen entonces dos ventiladores “equivalentes” a los dos flujos másicos que simulaban los quemadores. Para ello se establece que los ventiladores proporcionen el flujo másico que se desea en cada uno de ellos justo cuando las caídas de presión son las que cada quemador va a necesitar aportar según lo obtenido en la anterior simulación: 161,55 Pa en el principal y 141,1 Pa en el secundario.

Las curvas características que se definen para ambos ventiladores son las siguientes:



Quemador principal.



Quemador secundario.

Para reducir en lo máximo posible el efecto de la rotación de los ventiladores, se definen ambos con una velocidad de rotación mínima: 0,1 rad/s. Una vez definidos completamente ambos ventiladores, se puede comenzar con las simulaciones.

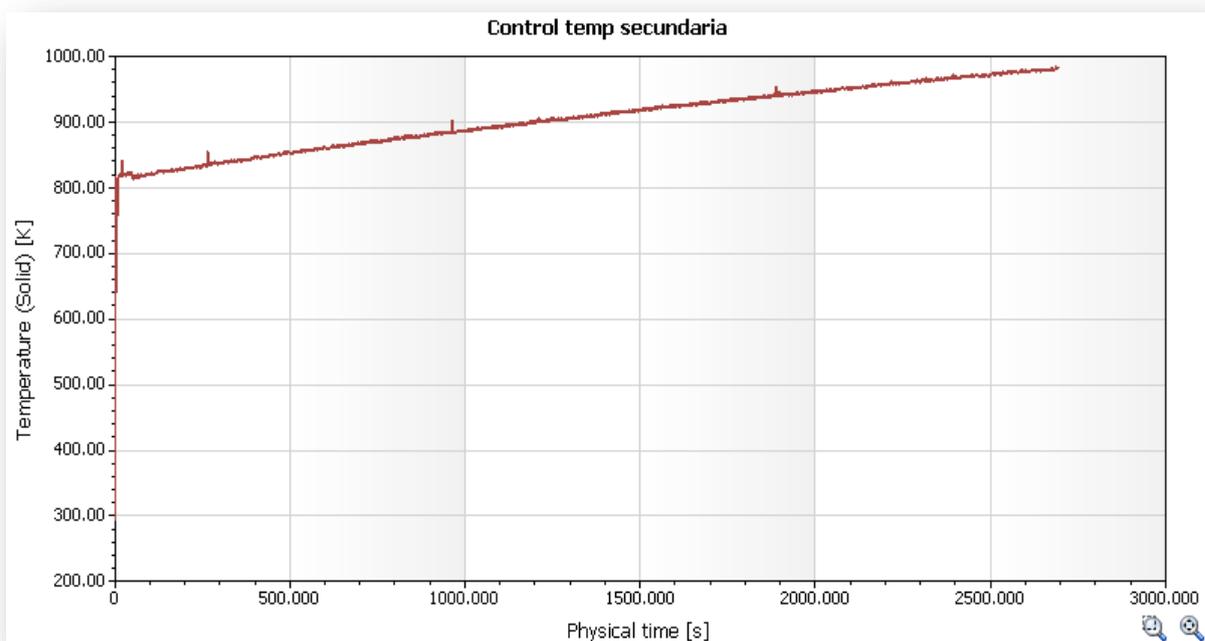
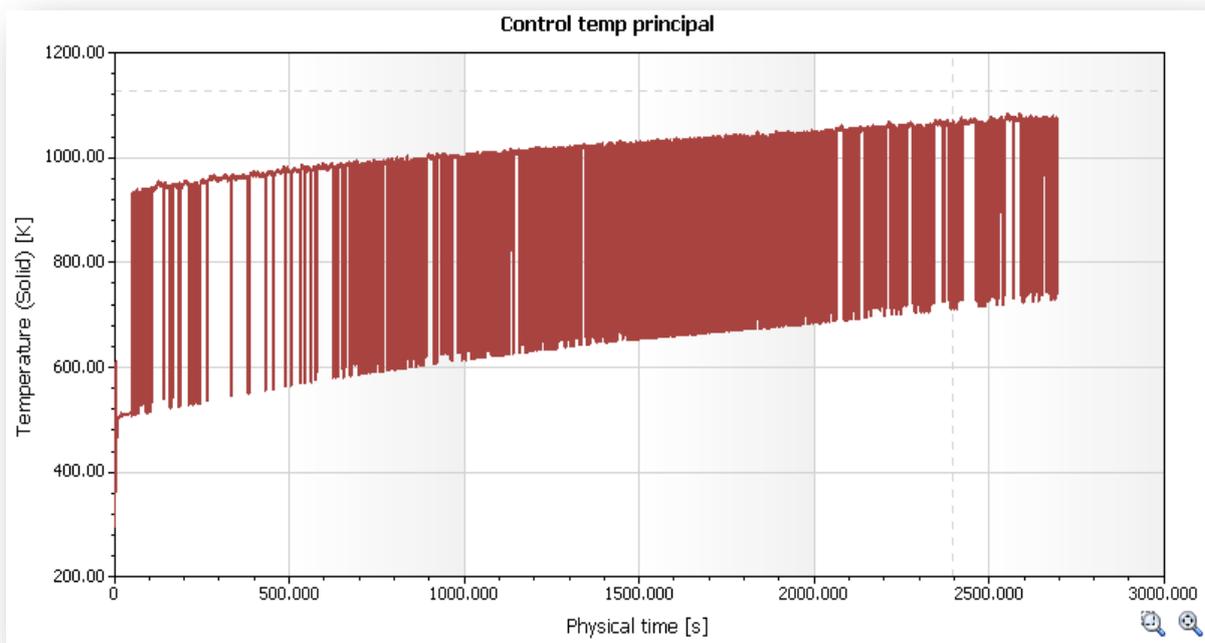
11.1 SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO CON CONTROL DE TEMPERATURA

Para llevar a cabo la simulación del calentamiento implementando el método de control de la temperatura, se ha de proceder igual que en las simulaciones anteriores, con las siguientes diferencias:

- Se debe definir el análisis como transitorio. Para ello, en *General Settings* se selecciona la opción *time-dependent*. También se deben definir los parámetros del análisis transitorio en *Calculation Control Options*, donde se toma un tiempo de análisis (*Maximum physical time*) de 45 minutos o 2700 segundos, un paso de tiempo (*Manual time step*) de 0.1 segundos y se ordena al programa que guarde los resultados que se vayan obteniendo cada 5 segundos (*Periodic saving*). De esta manera se podrá observar el calentamiento en el horno 45 minutos después de haberse encendido los quemadores, así como el proceso de calentamiento hasta llegar a ese punto.

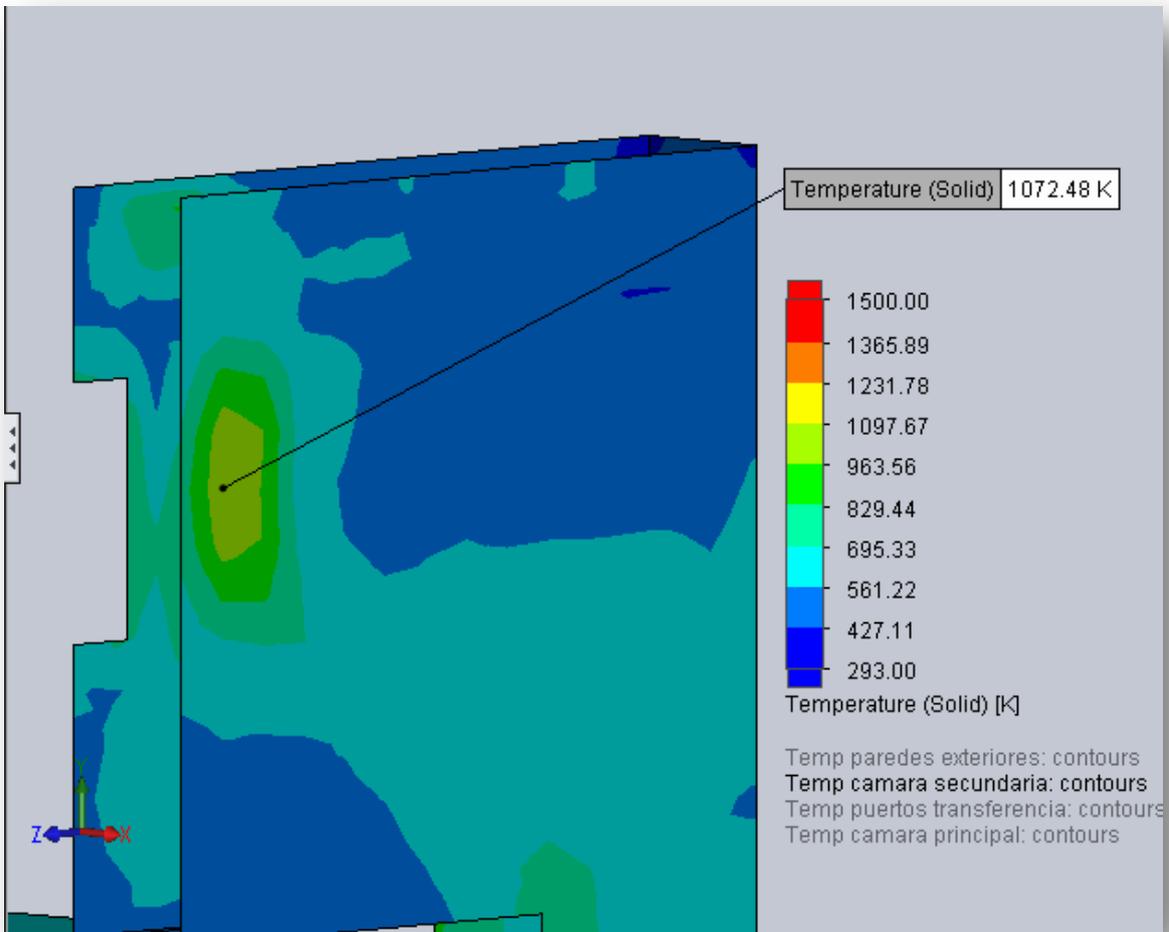
- Se deben añadir los dos ventiladores definidos anteriormente en los dos orificios donde antes se aplicaban las condiciones de contorno de flujos másicos de entrada. Una vez hecho esto, se debe activar la opción *Toggle* para ambos. Después, se deben seleccionar los parámetros que se usarán como control para cada quemador. Es necesario entonces elegir las temperaturas de las paredes en los dos puntos calientes que se definieron en el apartado 10.1, que son aquellos donde se dan las temperaturas más elevadas. Se ordena al programa que apague el quemador correspondiente si el termopar detecta que la temperatura es superior a 1086°C. Finalmente, se le ordena que vuelva a encender el quemador si la temperatura cae por debajo de 960°C, según lo establecido en el apartado anterior.

Ya se puede llevar a cabo el análisis transitorio. Una vez se tienen los resultados, en primer lugar se observan las temperaturas que han detectado los termopares:



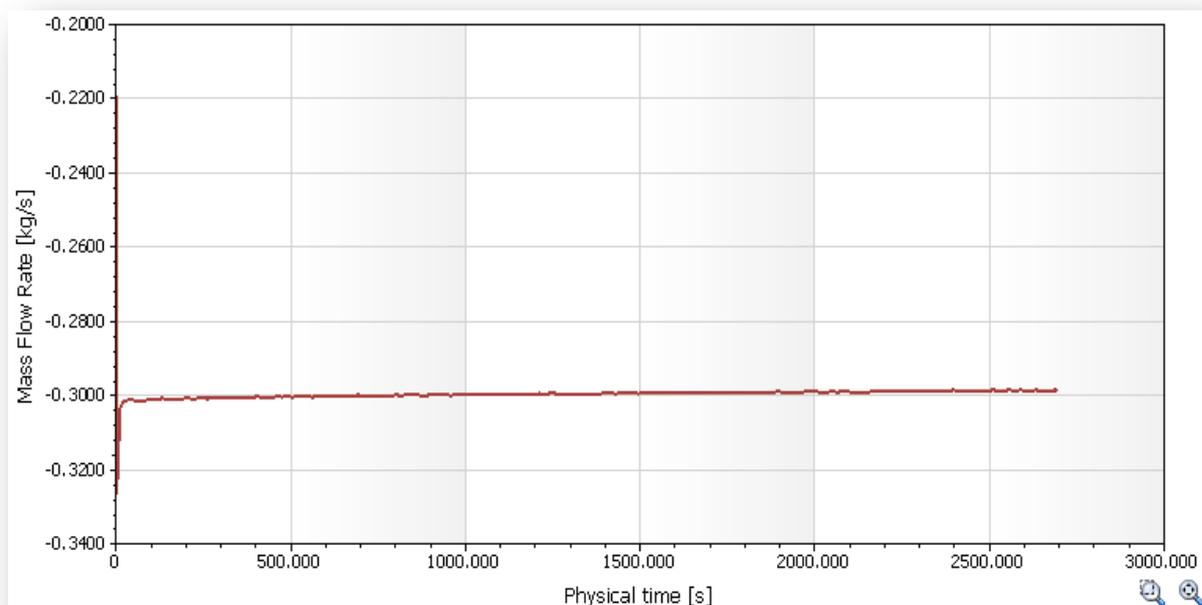
Los saltos en la primera gráfica son debidos al mallado y al paso de tiempo elegidos para el análisis, siendo los valores superiores los que nos interesan para este estudio. Se observa un calentamiento progresivo de las paredes, cuya temperatura máxima pasados 45 minutos alcanza los 1075

K. La siguiente captura muestra de forma gráfica la temperatura del termopar en ese momento:



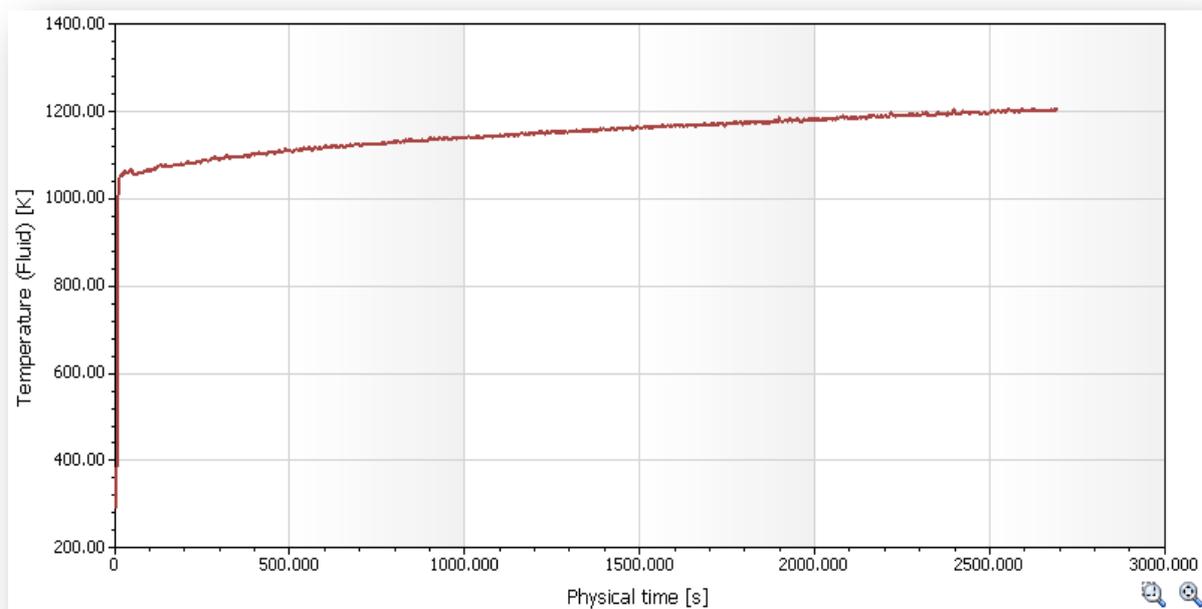
En cuanto a la segunda gráfica, el calentamiento es también progresivo, alcanzándose una temperatura máxima en torno a los 982 K.

En ambos casos las temperaturas están lejos de alcanzar los valores máximos definidos, por lo que los quemadores no deberían haber sido apagados aún en ninguna ocasión. Se comprueba este punto a partir del caudal másico que sale por la chimenea:



Efectivamente, el flujo másico de salida se mantiene constante en torno a los 0,3 kg/s. Los quemadores no han sido apagados aún, y observando las gráficas se deduce que aún tardarán un cierto tiempo en alcanzar los valores máximos.

Sin embargo, es necesario establecer un periodo de precalentamiento, pero esperar hasta que se alcancen las temperaturas máximas puede llevar demasiado tiempo y no ser rentable en absoluto. Si se dibuja la temperatura de los gases a la salida de la chimenea, se observa lo siguiente:

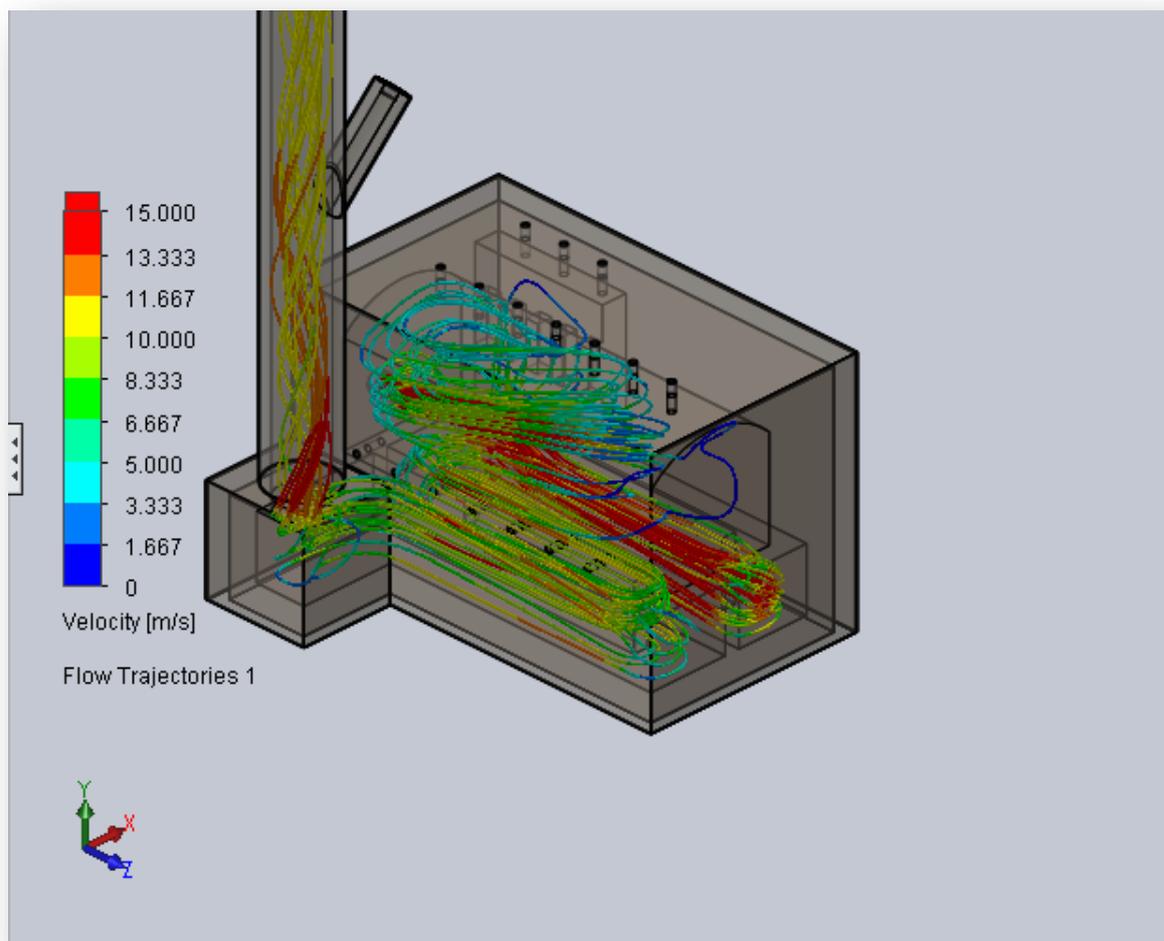


La temperatura de los gases ya se está estabilizando en torno a los 1200 K, por debajo de los 1220 K que se habían definido en el apartado 5.3 para dimensionar la chimenea. Esto quiere decir que los gases ya están llegando al estado estacionario y que la temperatura de los mismos en la cámara secundaria es superior a los 850°C que manda la normativa.

En conclusión, se decide establecer un periodo de precalentamiento de 45 minutos, durante el cual no se podrá introducir la carga en el horno. Pasados estos 45 minutos se podrá introducir la carga, pese a que las temperaturas de las paredes no hayan alcanzado aún sus valores máximos, ya que las temperaturas son lo suficientemente altas para cumplir las normativas. Los quemadores seguirán funcionando aunque se introduzca la carga hasta alcanzar los valores máximos.

11.2 SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO CON CONTROL DE VELOCIDAD

En primer lugar, se observan las velocidades en la cámara secundaria que se obtienen en el apartado anterior:



La velocidad a la salida de la cámara secundaria supera los 3,9 m/s que se habían establecido como límite en el apartado 10.2. Esto significa que mientras que ninguno de los quemadores se apaga durante el precalentamiento debido al control de las temperaturas, si deberían hacerlo debido al control de la velocidad. Sin embargo, se define el control de velocidad de manera que solo esté activo durante el proceso de cremación, cuando la célula fotovoltaica detecta una carga en el interior del horno. Se hace de este modo ya que la normativa que impone la permanencia de los gases en la cámara secundaria se refiere a aquellos que resultan como producto de la combustión de la carga del horno, en este caso el ataúd. Durante el precalentamiento no hay carga en el horno, luego no tiene sentido aplicar entonces el control de velocidad, ya que lo único que se conseguiría es alargar el periodo de precalentamiento. De todas formas, se lle-

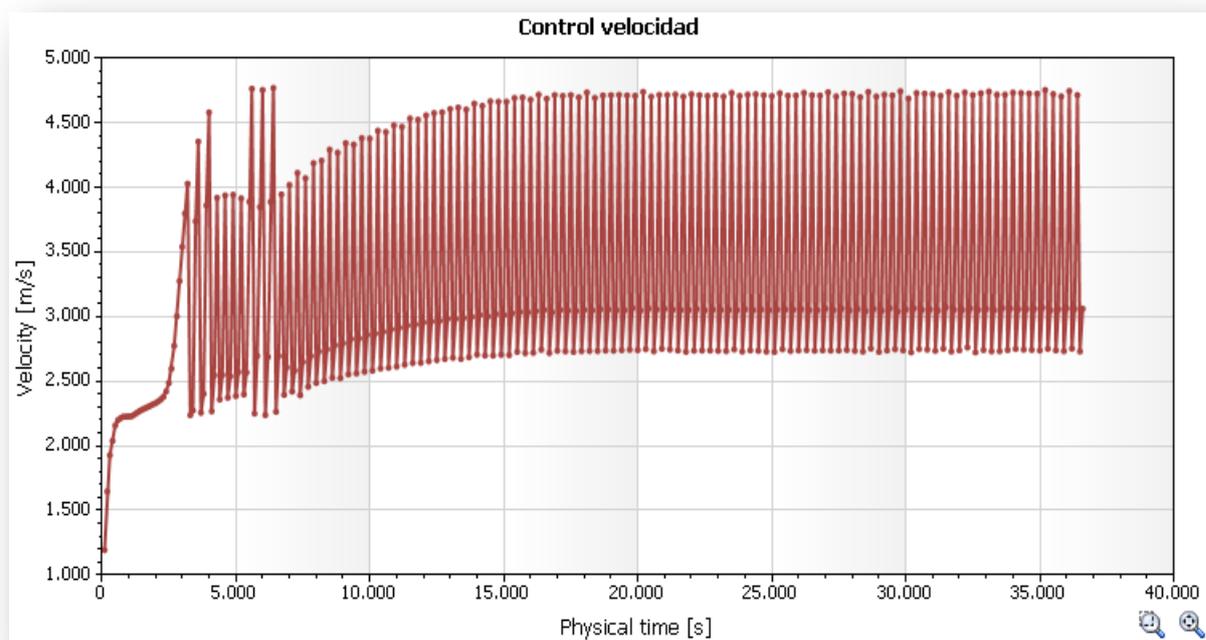
va a cabo una simulación idéntica a la anterior pero cambiando el control de temperatura en ambas cámaras por el control de velocidad, de modo que se pueda observar su funcionamiento. Como ya se mencionó anteriormente, la herramienta *Toggle* solo permite definir un parámetro de control por flujo de entrada, por lo que no se pueden aplicar ambos controles a la vez, como finalmente ocurrirá en el horno.

Para llevar a cabo esta simulación se emplea el modelo inicial sin chimenea que se empleó en las primeras iteraciones. El análisis transitorio es el mismo, solo cambia que el parámetro de control de ambos quemadores se define como la velocidad media a la salida del horno.

Para definir el control de velocidad se ordena que los quemadores se apaguen cuando la velocidad a la salida del horno supere los 3,9 m/s y que se vuelva a encender cuando dicha velocidad caiga por debajo de los 3,4 m/s.

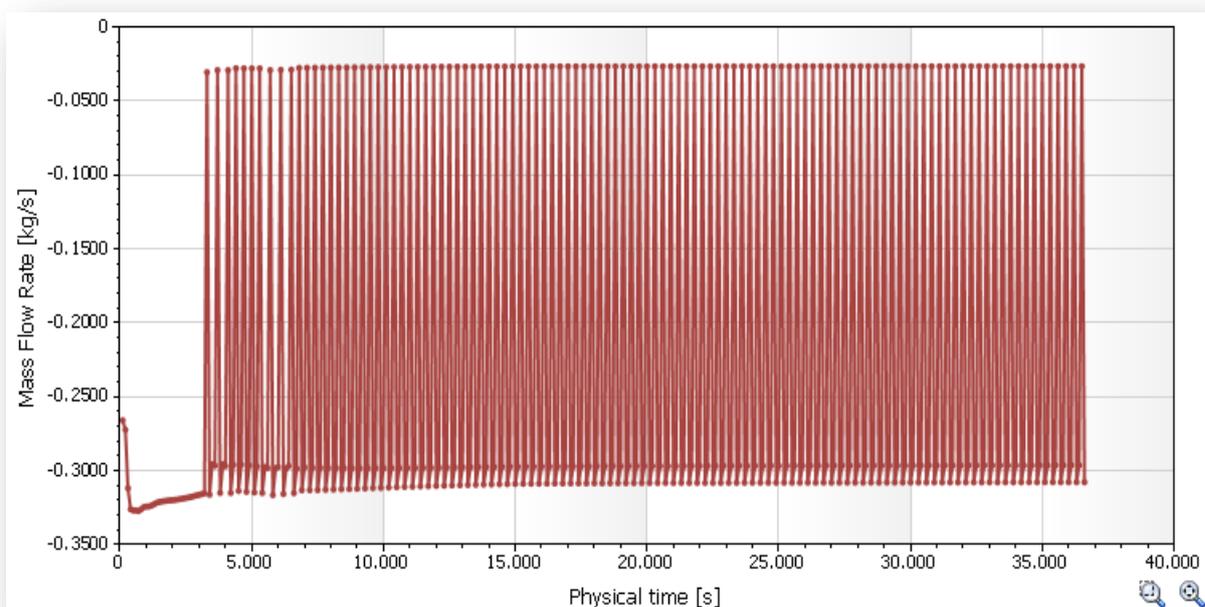
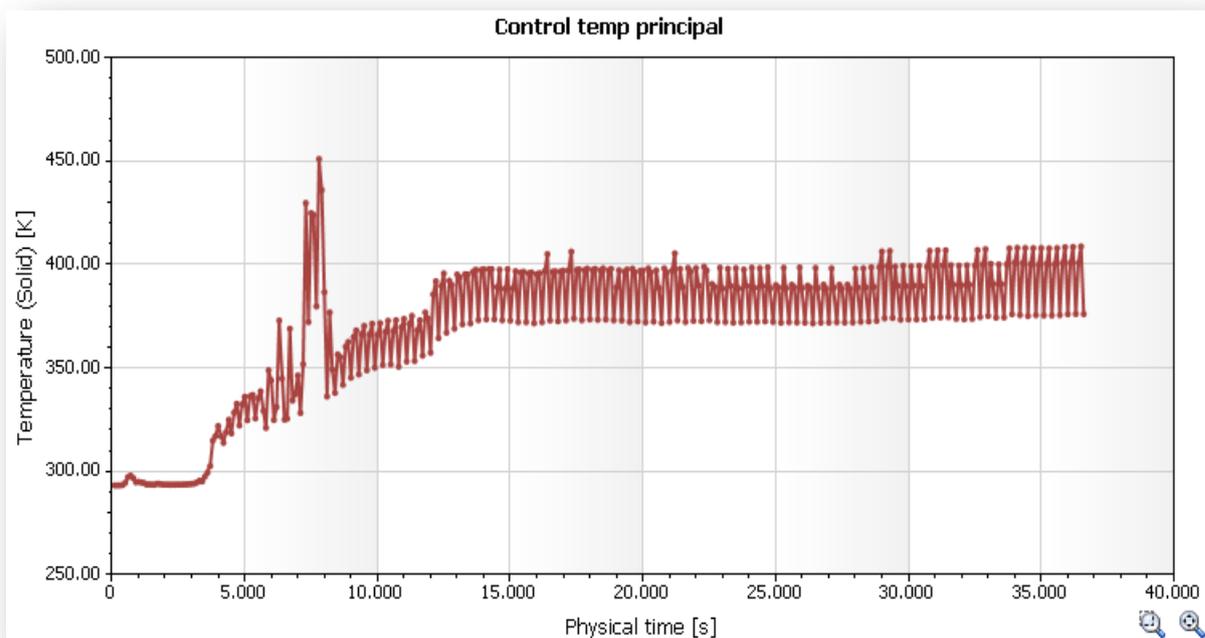
Además, a partir de los datos obtenidos en la simulación con la chimenea, se define la presión a la salida del horno como una presión estática de valor 101363 Pa.

Una vez se han simulado 36 s, se para el proceso para ver los resultados obtenidos hasta ese momento. Si se dibujan los valores que va tomando el control de velocidad, se obtiene la siguiente captura:



Se observa como la velocidad va oscilando por debajo y por encima del límite. Esto quiere decir que los quemadores se encienden y se apagan una vez tras otra en periodos de tiempo inferiores a un segundo.

A continuación se muestran los valores de temperatura y flujo másico a lo largo del tiempo que detectan el termopar de la cámara principal por un lado y el caudalímetro a la salida del horno por el otro:



El flujo másico varía igual que la velocidad, pasando de los 0,3 kg/s cuando los quemadores están encendidos a prácticamente 0 kg/s cuando estos se apagan. Los valores no son exactos ya que para la simulación se han tenido que sustituir los flujos másicos de entrada por ventiladores, los

cuales proporcionan flujos de entrada que no son constante al depender de la caída de presión.

La temperatura por su parte parece estabilizarse en torno a los 400 K, lo que implica que si el sistema de control de velocidad estuviera activo durante el precalentamiento, no se podrían alcanzar las altas temperaturas requeridas. Es por eso que este sistema de control se activa solo cuando la carga se encuentra dentro del horno. Además durante la cremación, al apagarse los quemadores, las velocidades y temperaturas no caerán tan rápido ya que la combustión de la carga y la introducción del aire de re-alimentación lo impedirán. Se supone entonces que el periodo que transcurre entre el apagado de los quemadores y su posterior encendido se dilatará, extremo que habría que comprobar mediante unas simulaciones que se escapan del objetivo del presente proyecto. A continuación, no obstante, se llevarán a cabo unos análisis que permiten una aproximación inicial al funcionamiento del horno durante la cremación.

12 SIMULACIONES DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN

En estas simulaciones se activa el sistema de realimentación y se añaden los flujos máscicos de entrada por los orificios practicados a tal efecto en la cámara principal y secundaria.

12.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN CON LOS QUEMADORES ENCENDIDOS

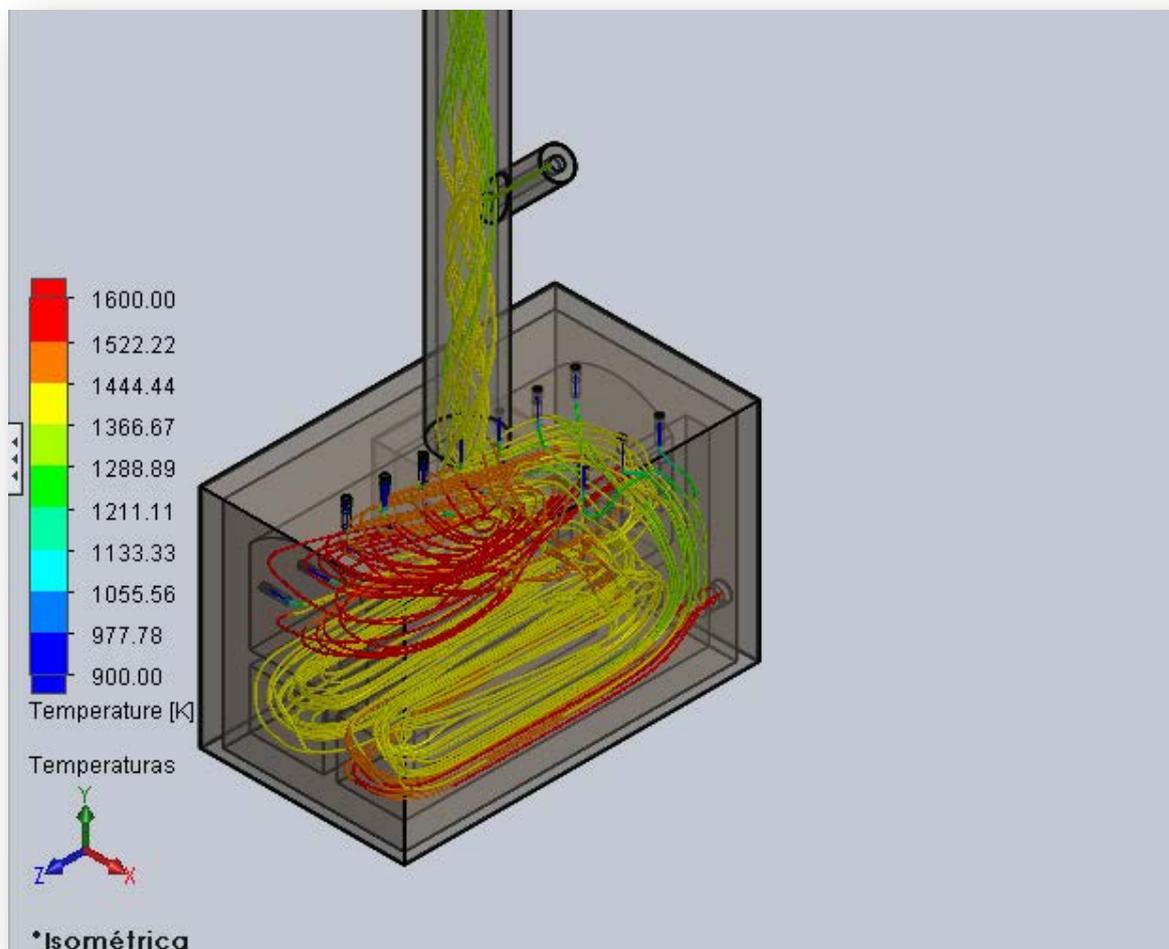
En la primera simulación se emplea el modelo final con chimenea y realimentación. Además de los flujos de entrada de 0,2 kg/s y 0,1 kg/s y el flujo de salida de 0,1 kg/s en la realimentación, se define un flujo total de entrada de 0,2 kg/s a repartir entre los 17 orificios de ventilación adicional: 14 en la cámara principal y 3 en la secundaria.

Como ya se explicó anteriormente, el sistema de realimentación recoge parte de los gases calientes que salen por la chimenea y los mezcla con aire que se toma del ambiente antes de introducirlos de nuevo en las cámaras del horno. La proporción de gases calientes y de aire en la mezcla es regulable gracias a las válvulas moduladoras de control.

En el apartado 9.2 se definió el ventilador adicional que succiona aire del ambiente con una capacidad máxima de 0,1 kg/s; que es también la capacidad máxima del ventilador de realimentación que succiona parte de los gases que salen por la chimenea. Para esta simulación se define pues un flujo de entrada total por los orificios de ventilación adicional de 0,2 kg/s que es el máximo posible que puede proporcionar el sistema de ventilación. Este flujo de entrada sería en este caso una mezcla al 50% de aire y de gases de combustión. Pero introducir esta mezcla impediría configurar la temperatura de entrada de los gases debido a una limitación del programa. Es por ello que se simplifica el problema suponiendo que los gases que entran por estos orificios son los mismos que los que entran por los quemadores.

Dado que la mezcla es en realidad mitad aire a temperatura ambiente y mitad gases de combustión, la temperatura de los gases que entran de nuevo a las cámaras será inferior a la temperatura a la que salen por la chimenea. La simulación correspondiente del apartado 8 mostraba una temperatura de los gases de combustión de 1542,20 K al llegar al ventilador. Para esta simulación se consideran los gases de realimentación a una temperatura inferior: 917,16 K, debido al efecto del aire a temperatura ambiente.

Con todos estos datos ya se puede llevar a cabo la simulación. Se obtiene la siguiente distribución de temperaturas:



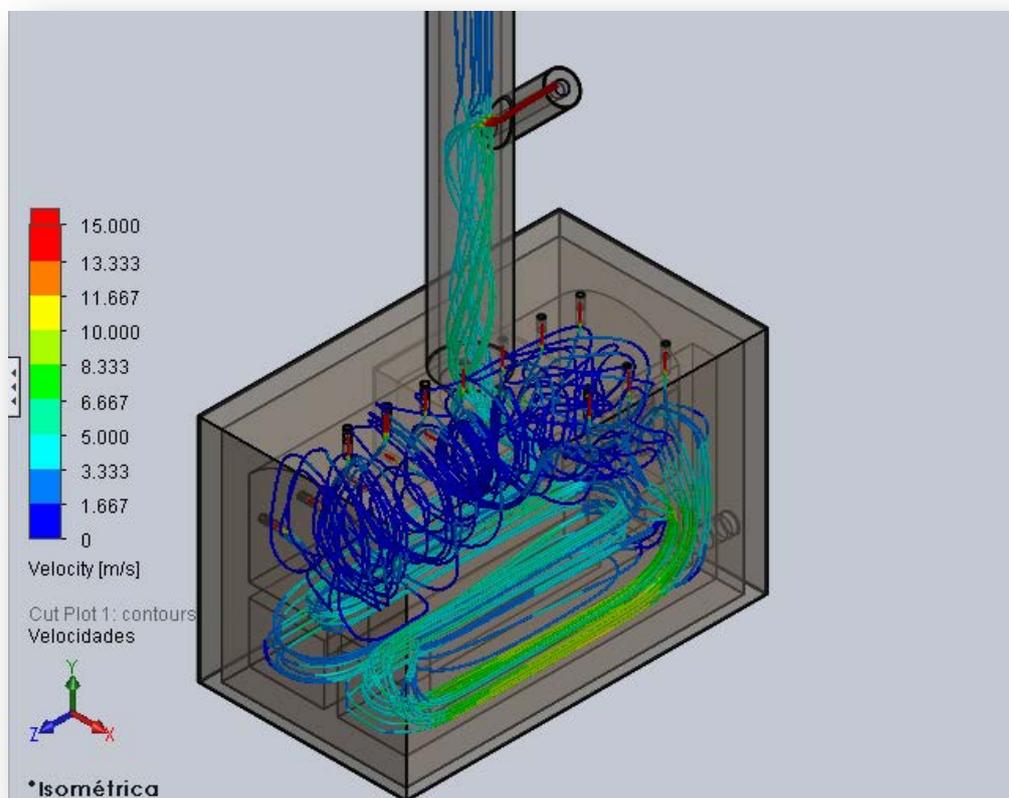
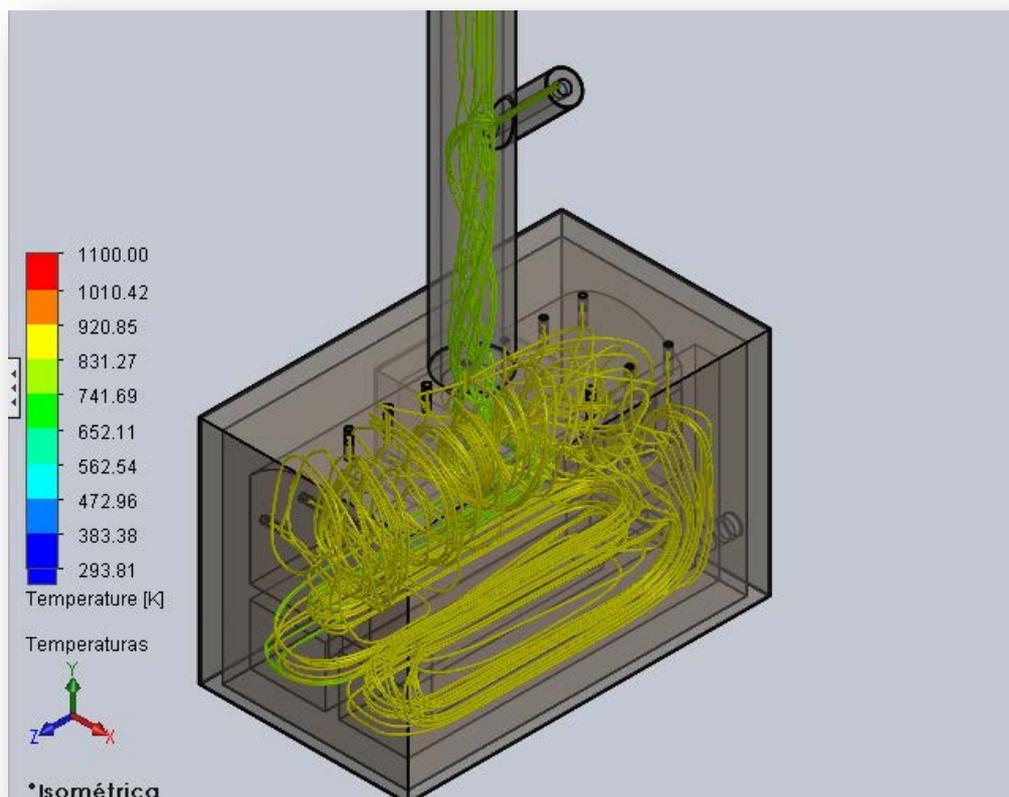
Los resultados no varían mucho de los obtenidos con el sistema de realimentación apagado. Es por eso que para estudiar el sistema de realimen-

tación resulta más interesante apagar los quemadores, lo cual se hace en la siguiente simulación.

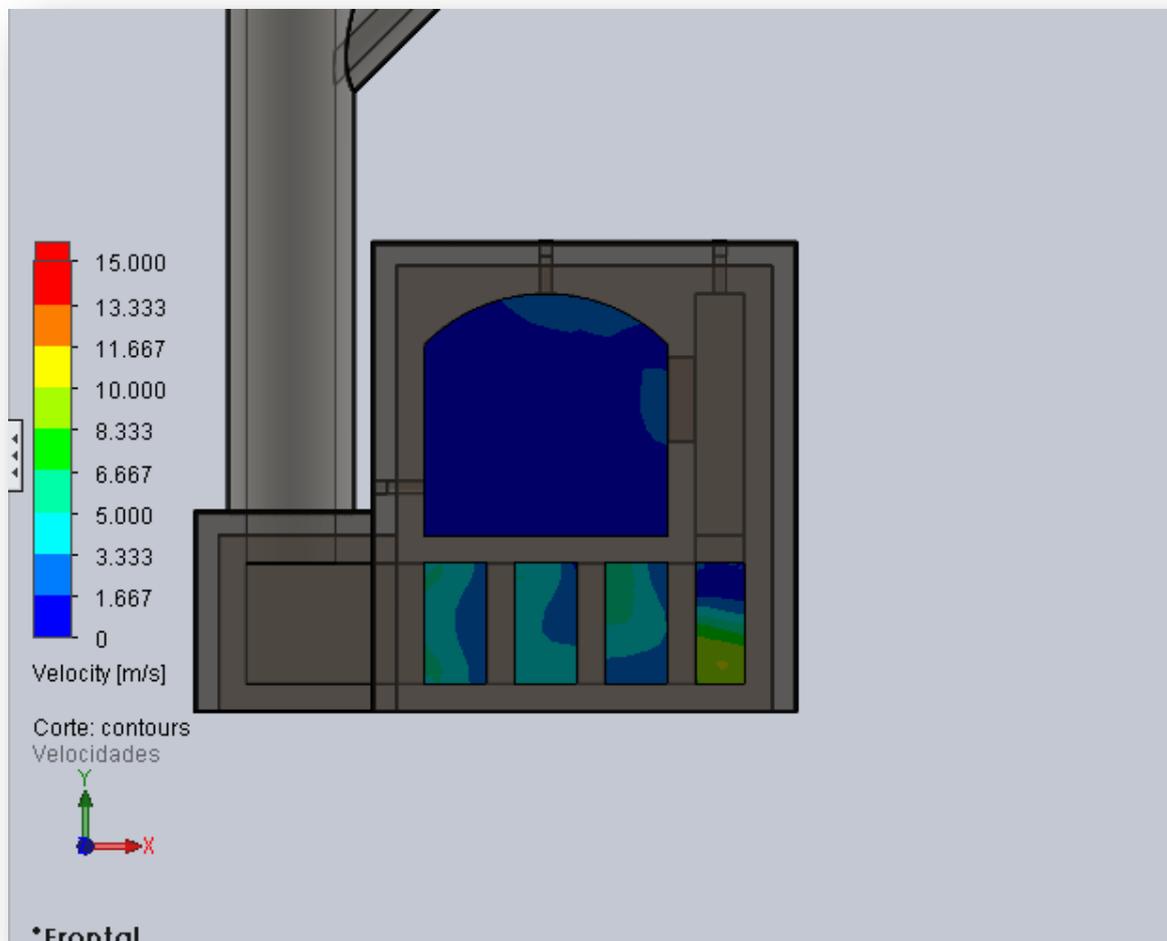
12.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REALIMENTACIÓN CON LOS QUEMADORES APAGADOS

Esta simulación es idéntica a la anterior excepto porque se apagan los quemadores. De esta manera se pueden analizar mejor los efectos del sistema de realimentación en el horno. Además, estas condiciones se asemejan más a las que realmente se darán durante la cremación, aunque faltaría añadir la combustión de la carga en la cámara principal, lo cual se escapa del análisis de este proyecto. No obstante, se considera que es precisamente la combustión de la carga la que permite mantener una temperatura más o menos constante en el interior del horno, de tal manera que la temperatura de los gases que entran por la realimentación se considera también constante, aunque en la realidad el proceso es totalmente transitorio, variando las temperaturas en cualquier intervalo que se considere.

Las distribuciones de temperaturas y de velocidades que se obtienen son las siguientes:



Las temperaturas y las velocidades son notablemente más bajas que en el caso anterior. Un corte transversal permite observar mejor las velocidades en los puntos medios de los pasos de la cámara secundaria:



En este caso la velocidad media ronda el valor límite de 3,9 m/s en los tres últimos pasos, lo que indica que durante el proceso de cremación si los quemadores están apagados los gases cumplirán la condición de permanencia en la cámara secundaria sin necesidad de que actúe el control correspondiente. Además, esta simulación se ha llevado a cabo considerando el flujo másico máximo posible, por lo que en el resto de los casos las velocidades serán aún menores.

Las temperaturas que se alcanzan en las paredes de ambas cámaras son las siguientes:

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes internas cámara principal	K	753,29	850,06	782,55

Tabla 22.

Nombre	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio
Temperatura paredes internas cámara secundaria	K	584,71	831,16	742,48

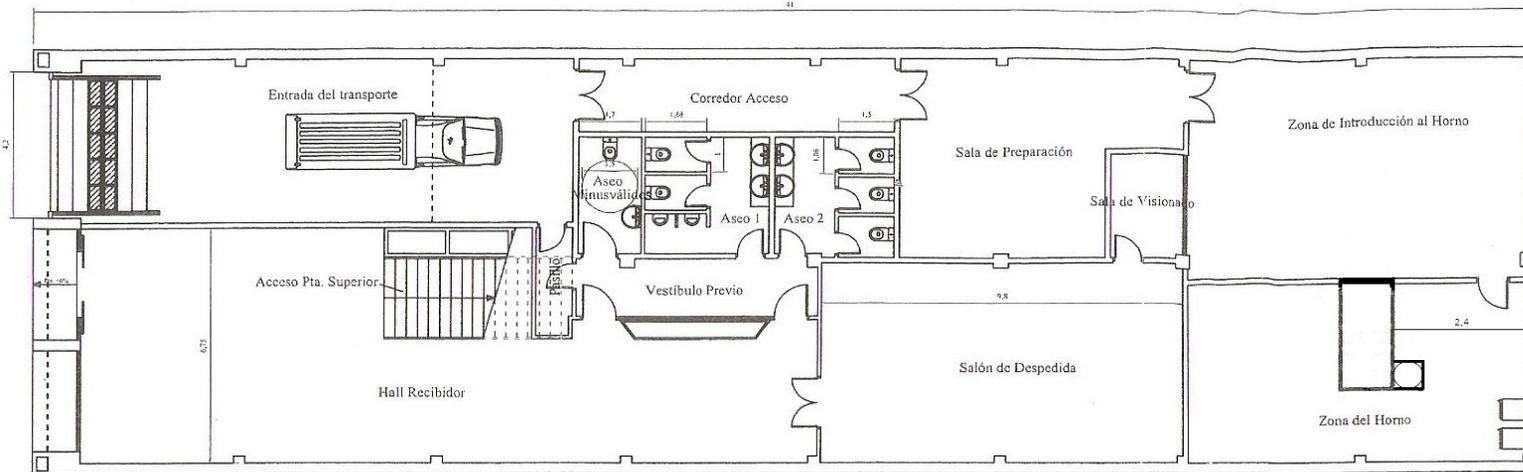
Tabla 23.

Estas tablas muestran que las temperaturas son muy inferiores a las obtenidas cuando los quemadores están funcionando. De hecho, si se observa la captura de la distribución de temperaturas al principio de este apartado, se puede ver que los gases en la cámara secundaria ni siquiera alcanzan los 850°C que manda la normativa. Como conclusión se deduce que mientras que el sistema de control de velocidad no tendrá que activarse en un principio, no ocurrirá lo mismo con el de temperatura, que deberá encender los quemadores cada cierto tiempo durante la cremación para que las temperaturas sean lo suficientemente altas.

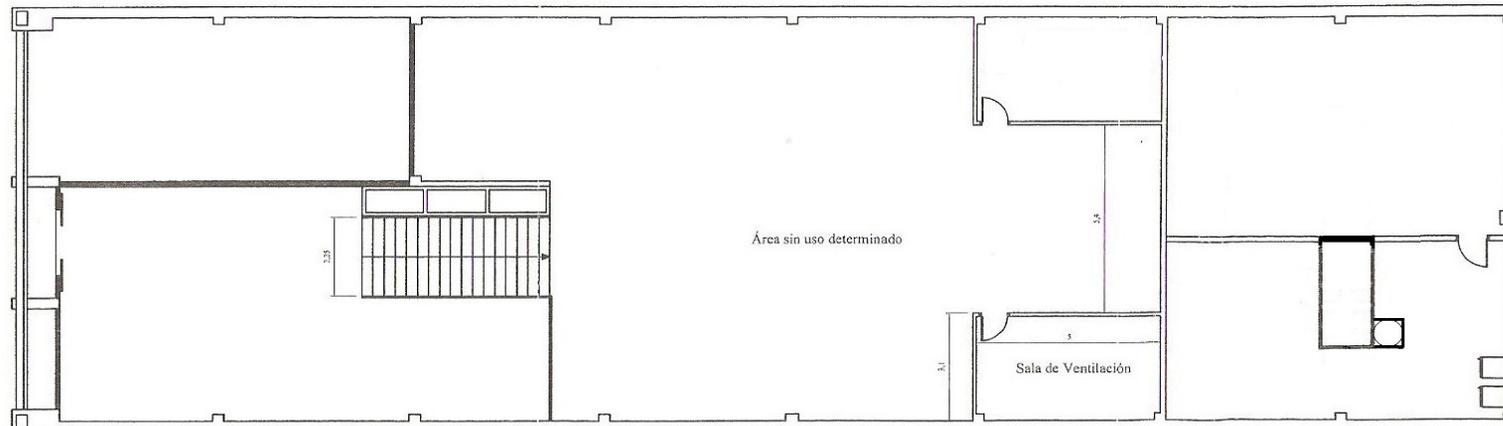
PLANOS



Departamentul responsabil Inginerul responsabil avizant:	Felicitarea laurui Asiur Comar	Tipul de asigurare	Polița de asigurare			
Proiectant legal	Dezine per Asiur Comar	Titlu, data expirării				
	Aprobarea per Dobro Stă		Rev.	Tipul de asigurare 2016-01-10	Termen an	Map

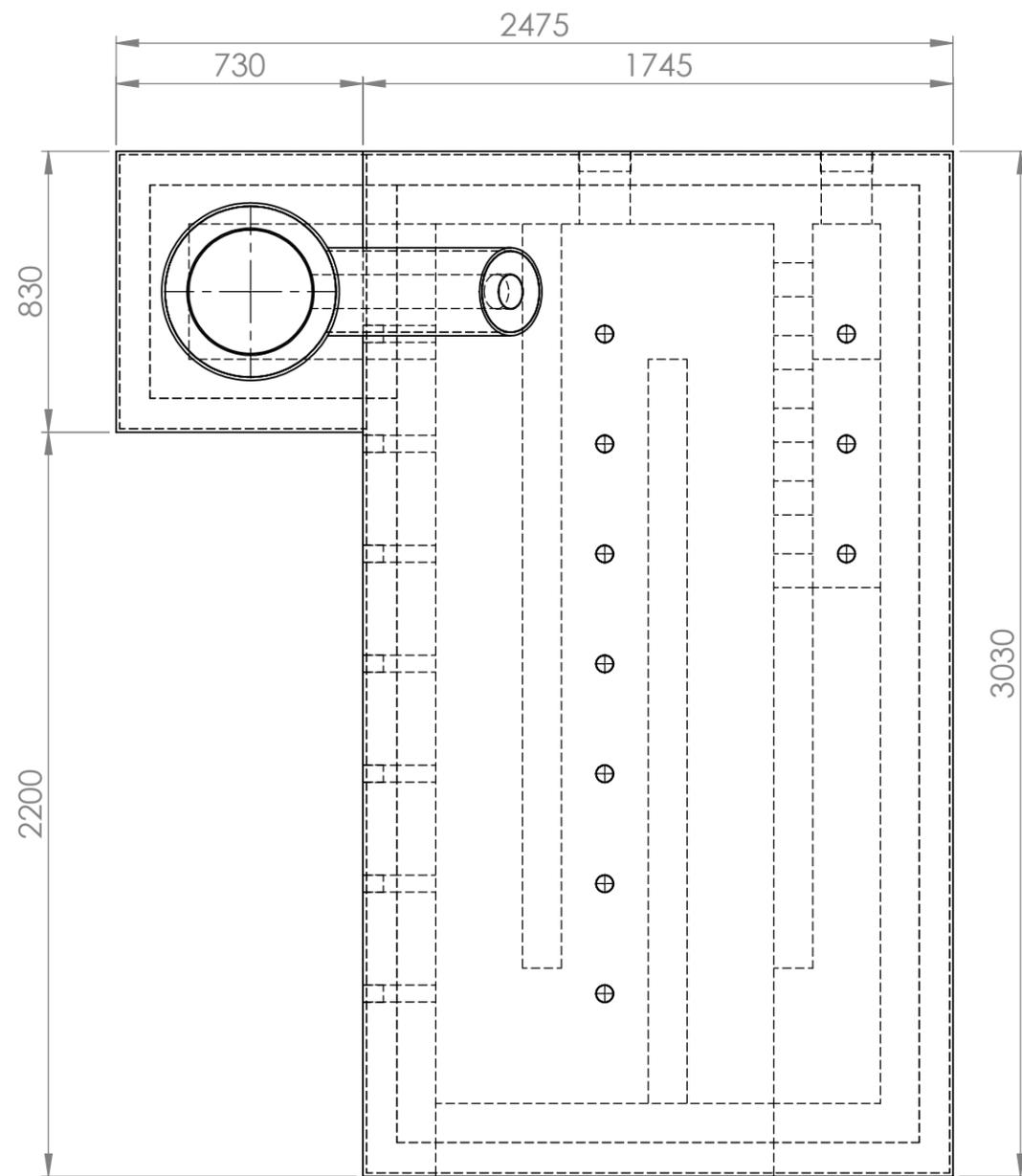


PLANTA BAJA

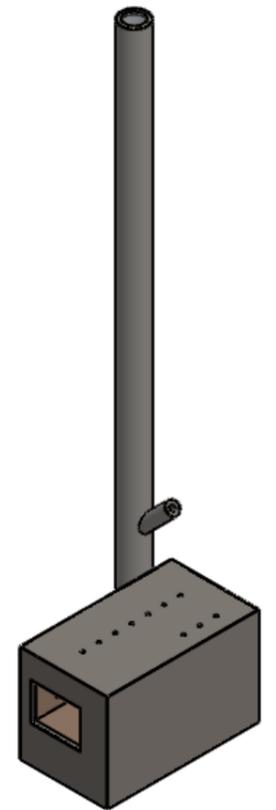


PLANTA CABRETE

Departamento responsable Ingeniería de Edificación y Arquitectura	Responsable técnico Arquitecto Cesar Cabrera	Fecha de elaboración	Folios del expediente Folios			
Proyecto legal	Excepción por Arquitecto Cesar Cabrera	Fecha, fecha de aprobación				
	Aprobado por Doble Firma		Rev.	Fecha de emisión 2016-01-18	Interno SI	Map

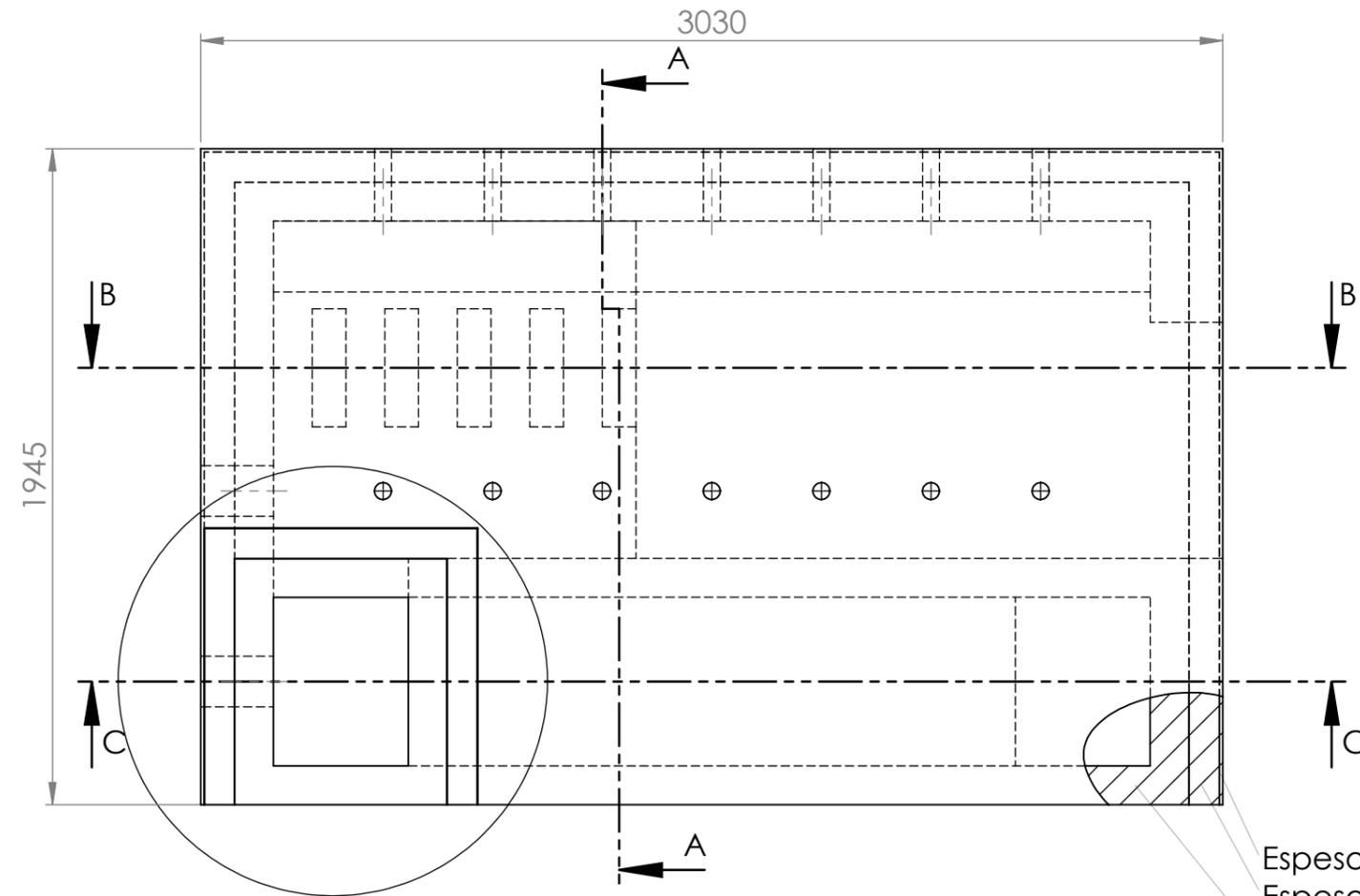
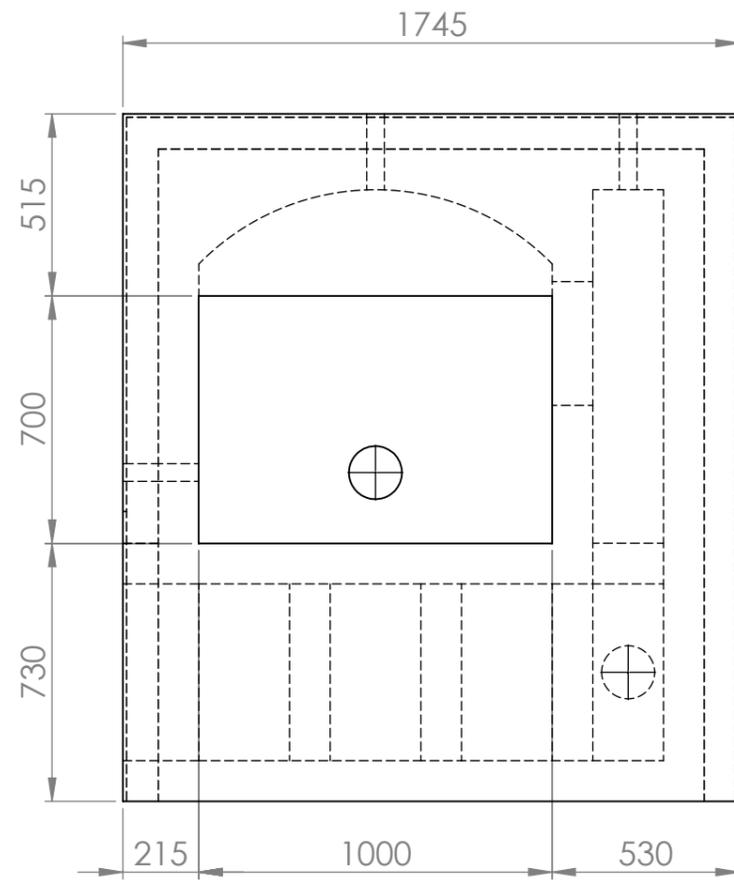
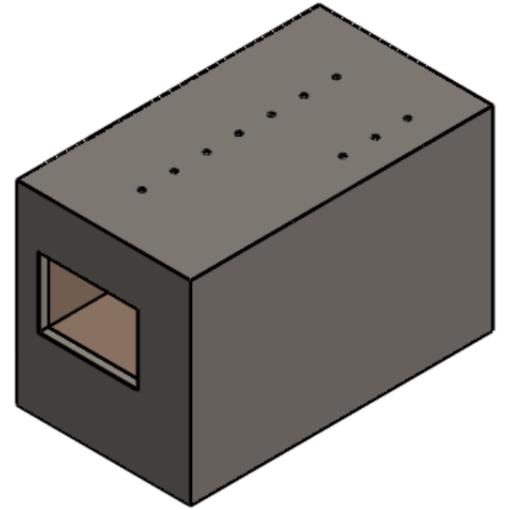


ESCALA 1:20



Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno y chimenea				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 1

Escala 1:20

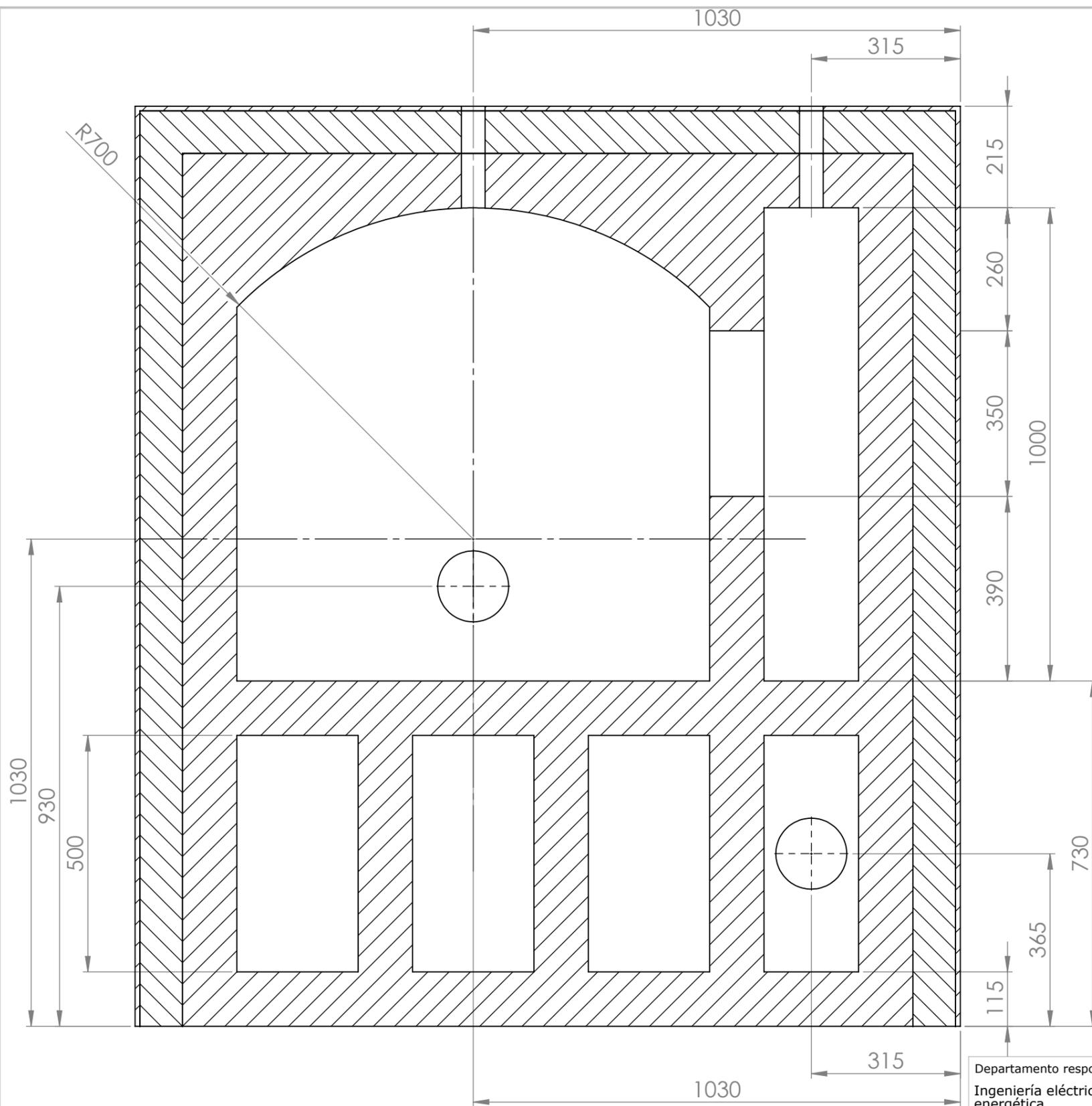


DEATALLE ORIFICIO SALIDA HORNO

Esesor lámina de acero = 10 mm
 Esesor material aislante = 90 mm
 Esesor ladrillo refractario = 115 mm

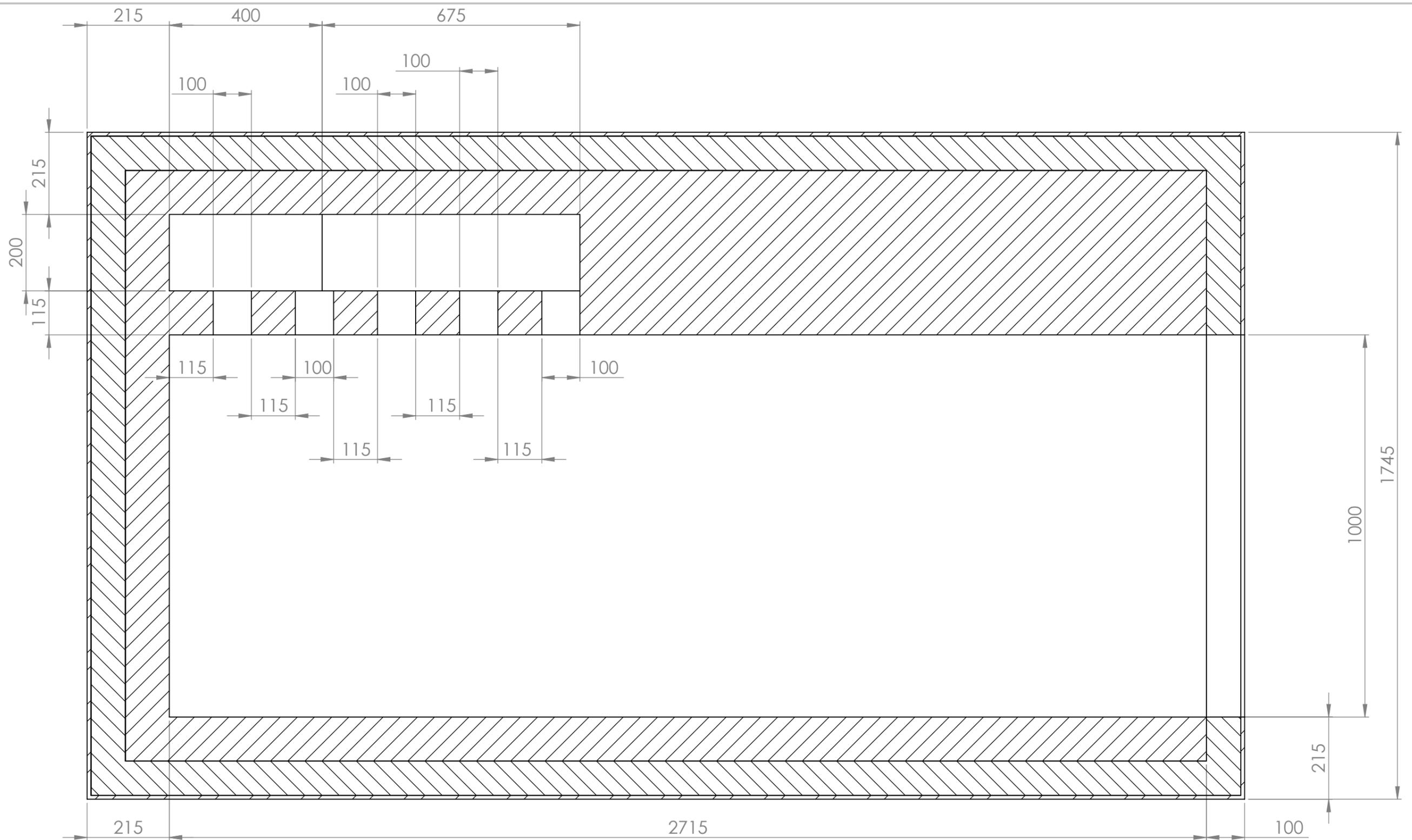
Dimensiones ladrillo refractario = 70 mm x 115 mm x 220 mm

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 1



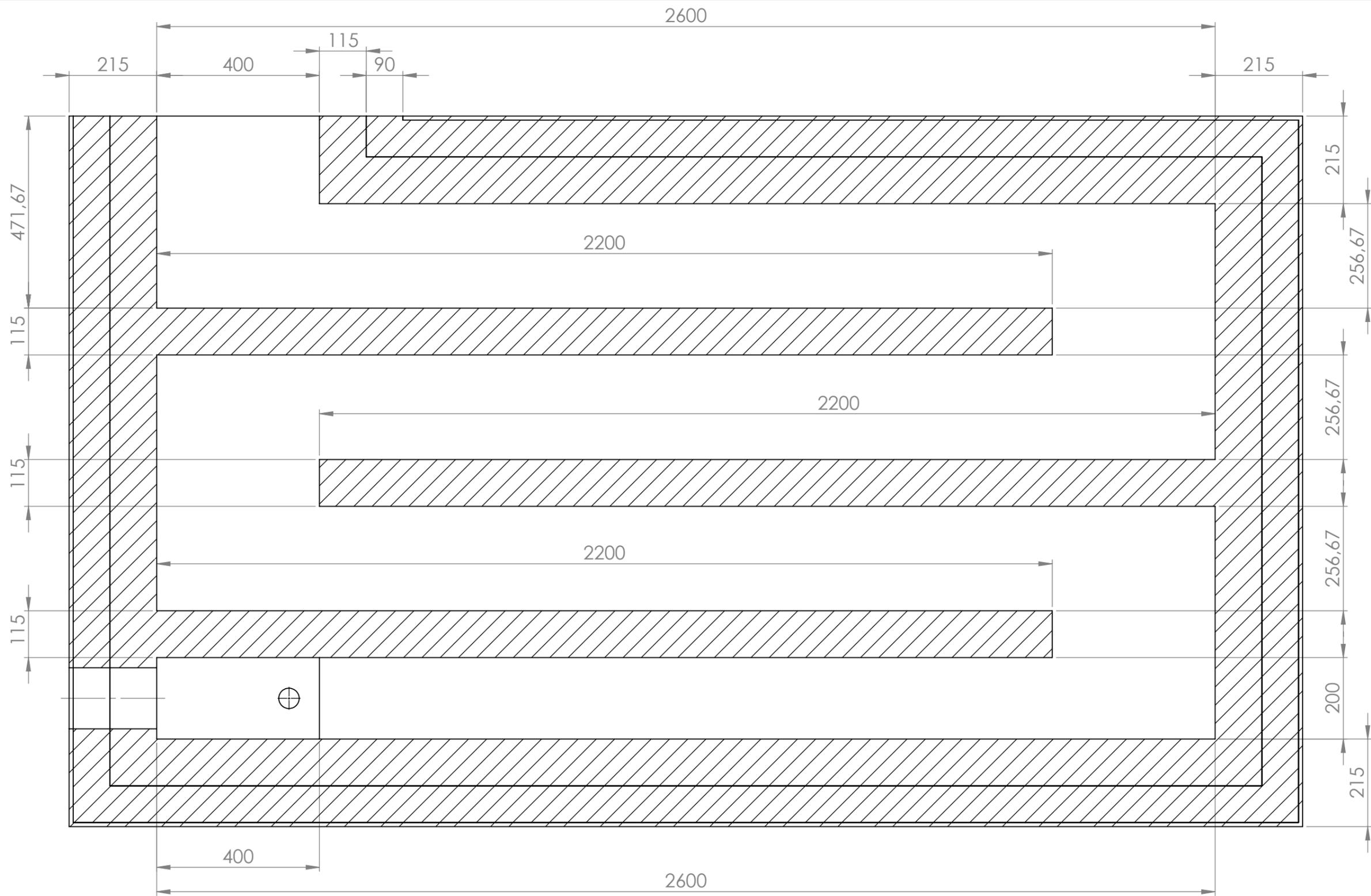
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado		
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno			
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es
					Hoja 2



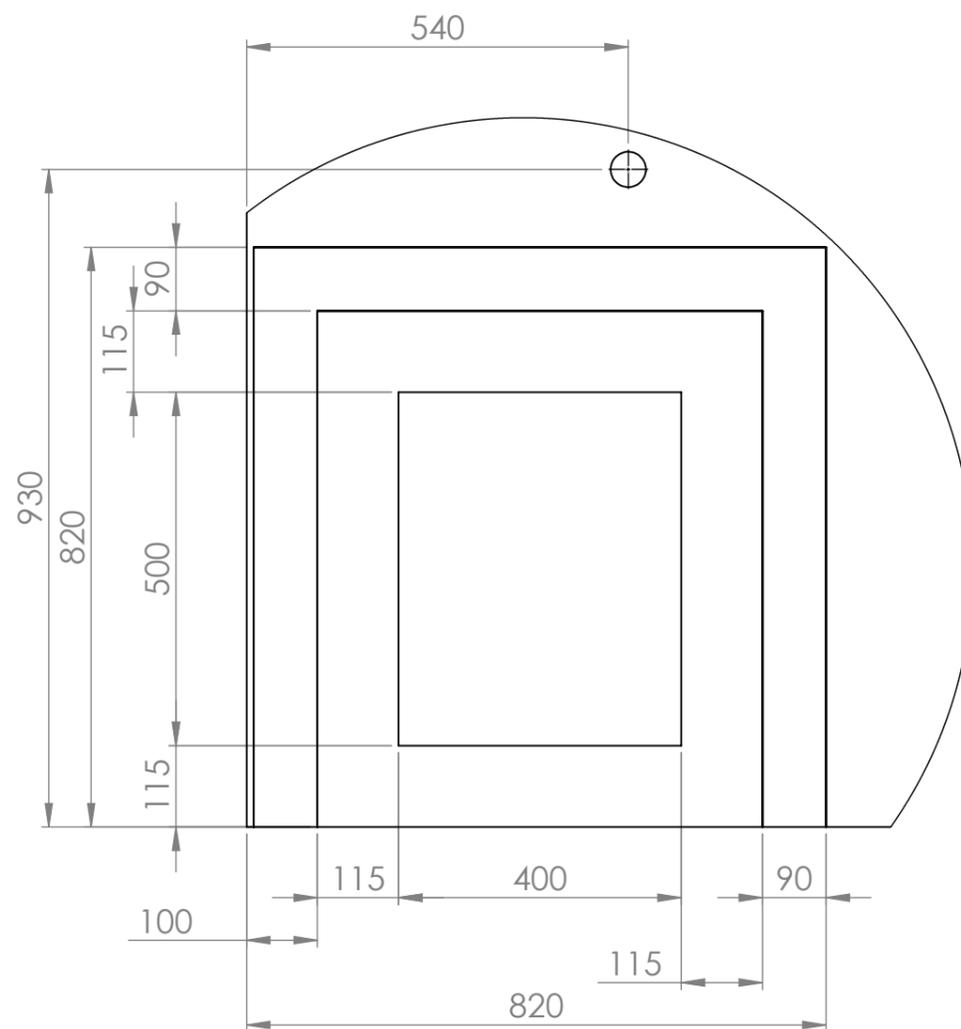
SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 3



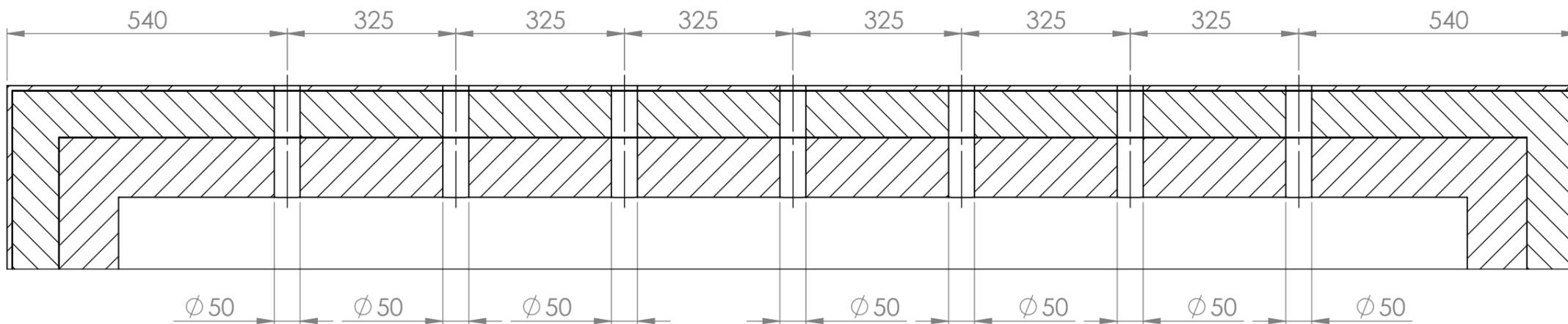
SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 4



DETALLE DEATALLE ORIFICIO SALIDA HORNO
ESCALA 1 : 10

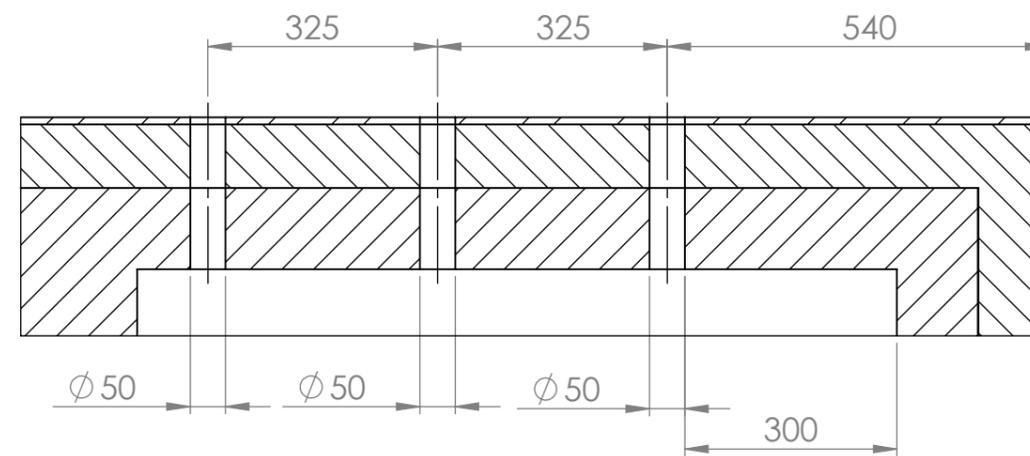
Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 5



DETALLE ORIFICIOS REALIMENTACIÓN SUPERIORES CÁMARA PRINCIPAL

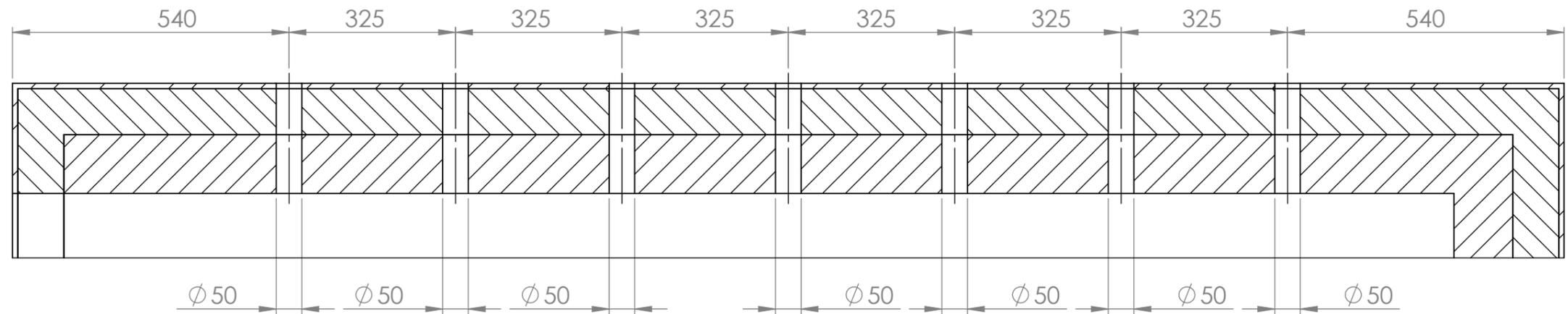
ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió					



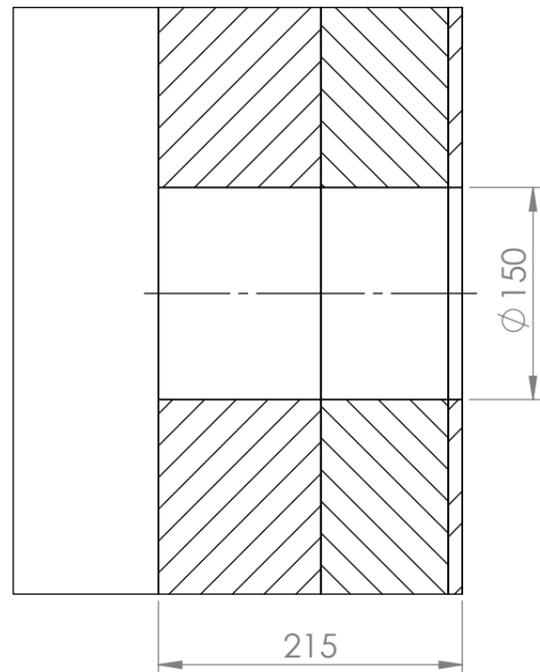
DETALLE ORIFICIOS REALIMENTACIÓN CÁMARA SECUNDARIA
 ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió					

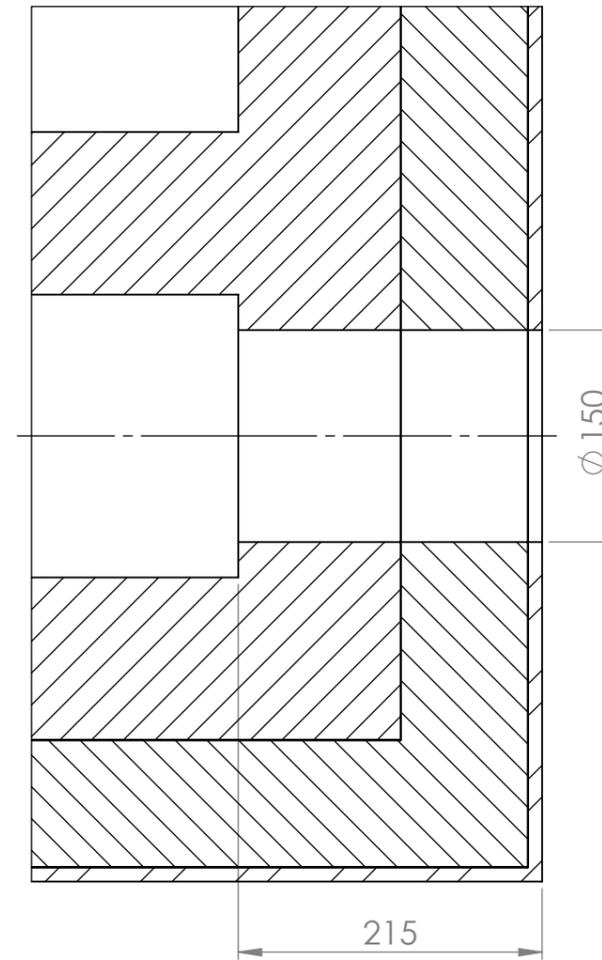


DETALLE ORIFICIOS REALIMENTACIÓN LATERALES CÁMARA PRINCIPAL
 ESCALA 1 : 10

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió					

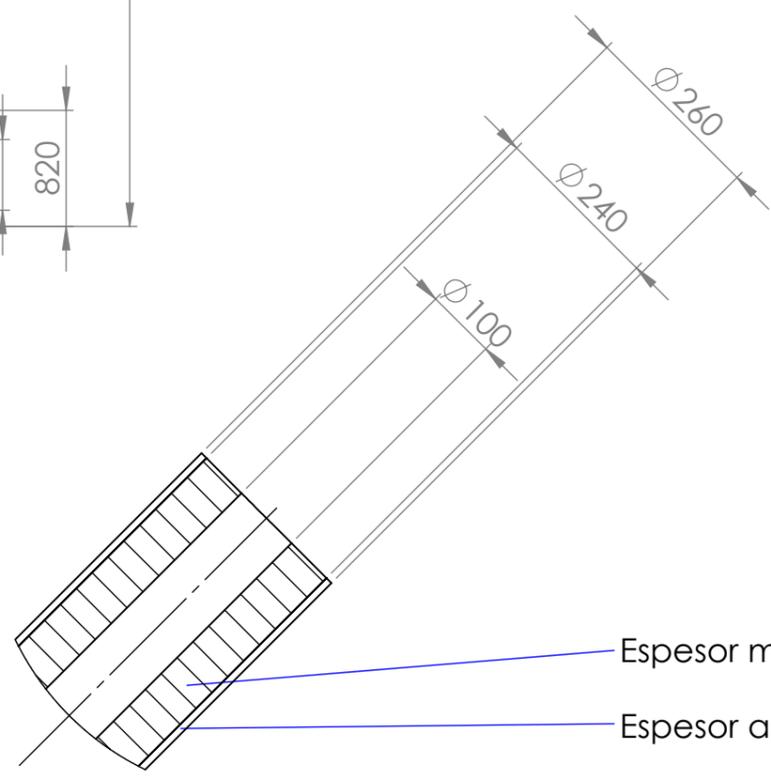
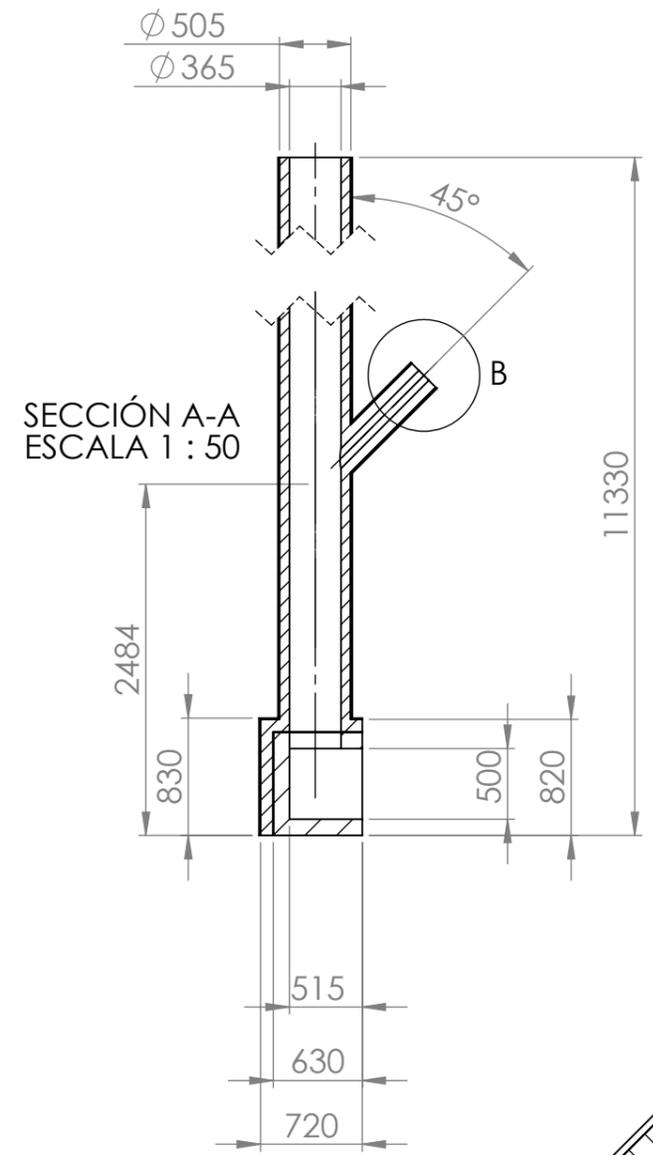
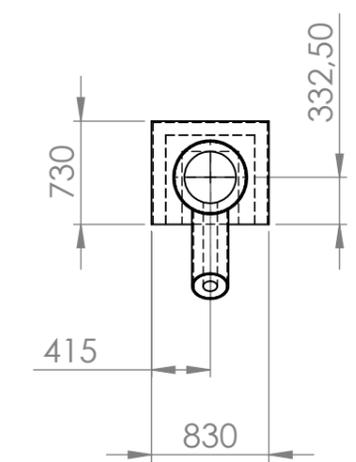
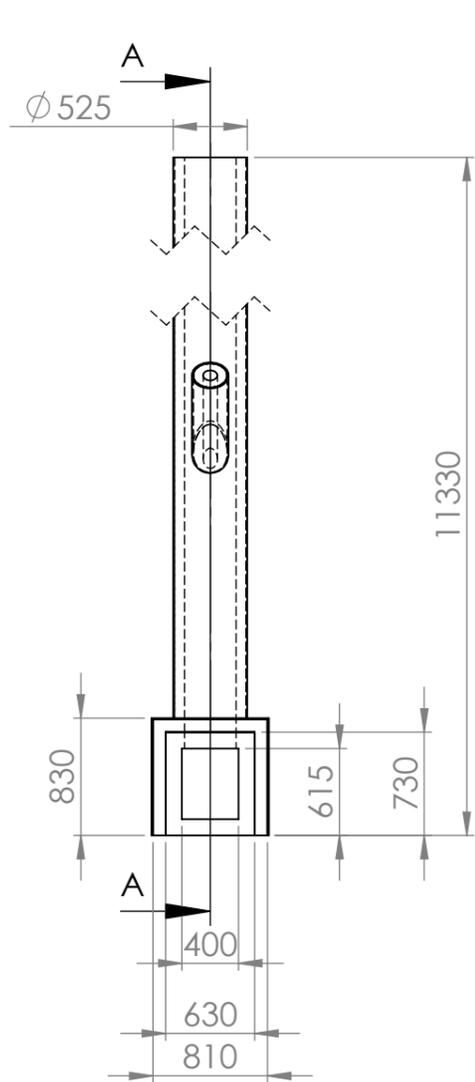


DETALLE ORIFICIO QUEMADOR PRINCIPAL
ESCALA 1 : 5



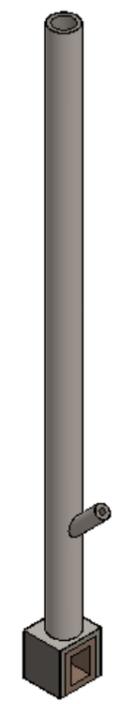
DETALLE ORIFICIO QUEMADOR SECUNDARIO
ESCALA 1 : 5

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Horno				
	Aprobado por Delfín Silió					



DETALLE B
ESCALA 1 : 10

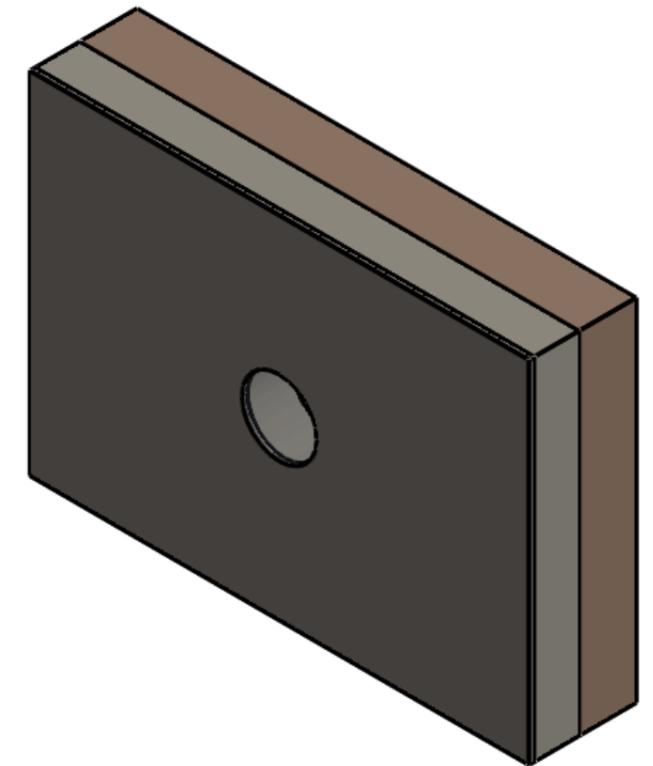
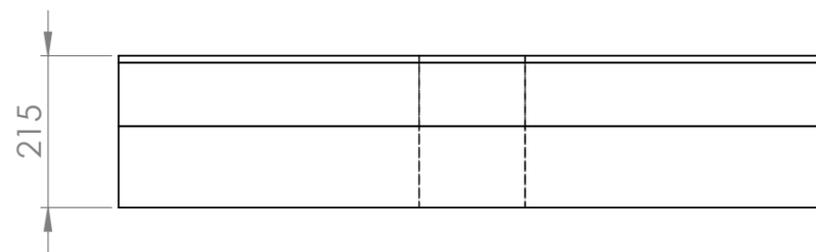
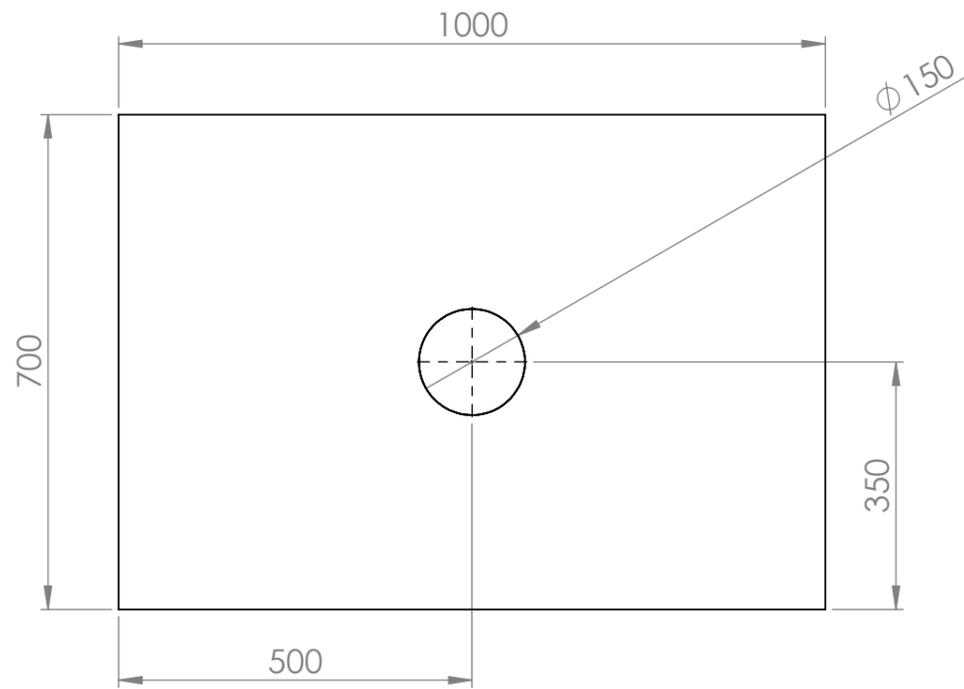
Espeor material aislante = 70 mm
Espeor acero inoxidable = 10 mm



Escala 1:50

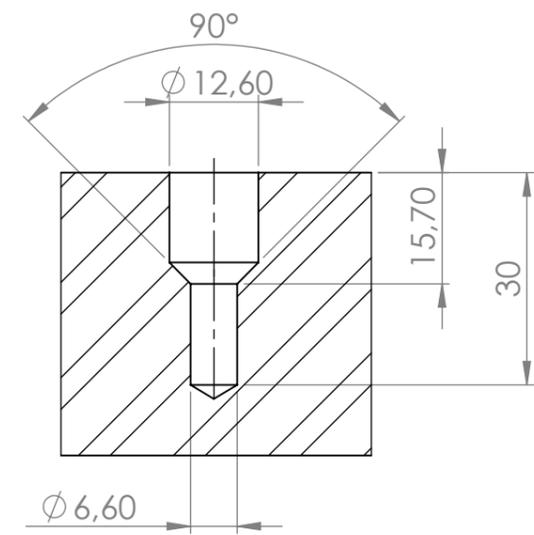
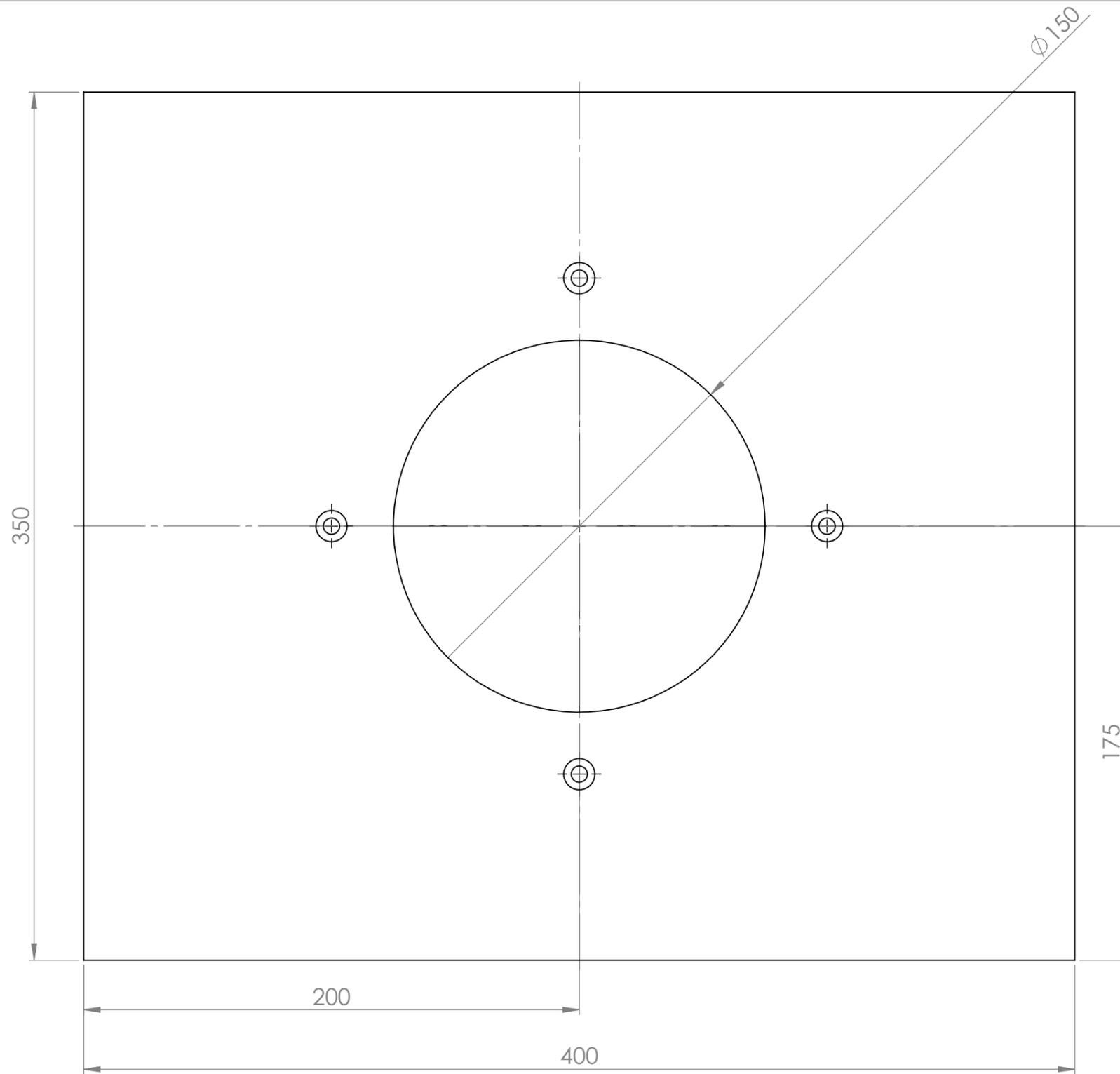
Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Chimenea				
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 1

ESCALA 1:10

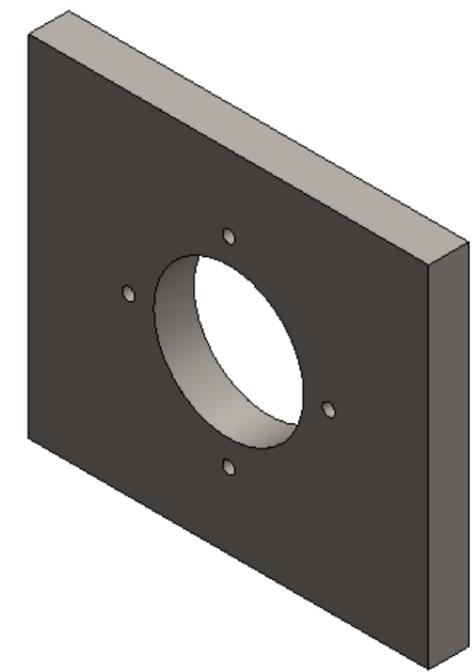


Espesor lámina de acero = 10 mm
 Espesor material aislante = 90 mm
 Espesor ladrillo refractario = 115 mm
 Dimensiones ladrillo refractario = 70 mm x 115 mm x 220 mm

Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Puerta				
	Aprobado por Delfín Silió					



Detalle avellanado
ESCALA 1 : 1



Departamento responsable Ingeniería eléctrica y energética	Referencia técnica Adrián Gómez	Tipo de documento	Estado del documento Editado			
Propietario legal	Creado por Adrián Gómez	Título, título suplementario Placa de sujeción	AB123 876-3			
	Aprobado por Delfín Silió		Rev.	Fecha de edición 2015-07-10	Idioma es	Hoja 1

PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE

1 OBJETIVO Y CONDICIONES	3
1.1 OBJETIVO	3
1.2 DISPOSICIONES GENERALES	3
1.3 CONDICIONES FACULTATIVAS	3
2 GARANTÍAS	4
3 PLAZOS	5
3.1 PLAZOS DE FABRICACIÓN	5
3.2 CONDICIONES DE PAGO	5
4 EXCLUSIONES	6
5 OBLIGACIONES DEL PROVEEDOR	8
6 RESPONSABILIDAD POR DAÑOS A TERCEROS	10
7 RETRASOS O SUSPENSIONES	11
8 CAUSAS DE RESOLUCIÓN DEL CONTRATO	12
9 CLÁUSULA DEL CONTRATO	13
10 CONDICIONES ESPECIALES	14
11 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	17
11.1 LADRILLO REFRACTARIO	17
11.2 MATERIAL AISLANTE	17
11.3 LÁMINA DE ACERO	17
11.4 MORTERO REFRACTARIO	18
11.5 CHIMENEA DE ACERO INOXIDABLE	18
11.6 PUERTA	18
11.7 QUEMADORES	18
11.8 SUMINISTRO DEL COMBUSTIBLE	19
11.9 VENTILADORES	19

11.10 CONDUCTOS DE VENTILACIÓN.....	19
11.11 TERMOPAR	20
11.12 CAUDALÍMETRO	20
11.13 REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR.....	20
11.14 VÁLVULA MODULADORA DE CONTROL.....	20
11.15 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE	20
11.16 MECANISMOS DE SEGURIDAD	21

1 OBJETIVO Y CONDICIONES

1.1 OBJETIVO

El objetivo de este Pliego de Condiciones es establecer las condiciones que se deben cumplir al ejecutar este proyecto.

1.2 DISPOSICIONES GENERALES

Lo dispuesto en la Norma UNE 24042 "Contratación de Obras. Condiciones Generales" será de obligado cumplimiento para el contratista de la obra siempre que por algún motivo no sea modificado el presente Pliego de Condiciones.

El cumplimiento de la Reglamentación del Trabajo correspondiente y de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo será también de obligado cumplimiento por el contratista y por todos los trabajadores, así como la contratación de todas las reglamentaciones de carácter social, como el Seguro Obligatorio, vigentes o que puedan ser dictadas cuando la obra se está ejecutando.

La obra contará con dos operarios encargados del montaje de la estructura del horno: un oficial 1ª y un ayudante, los cuales también serán los encargados de instalar los equipos necesarios para completar la instalación y de la puesta a punto.

La correspondiente autorización o capacitación de la Delegación Provincial del Ministerio competente para la aprobación de la obra deberá ser llevada por todos los operarios.

1.3 CONDICIONES FACULTATIVAS

La obra del presente proyecto se realizará con arreglo a las especificaciones técnicas dispuestas en sus apartados. Los operarios deberán llevar a cabo, de acuerdo a lo anterior, una ejecución adecuada de su trabajo según lo dispuesto en el proyecto.

2 GARANTÍAS

El proveedor se compromete a cumplir las condiciones de garantía dispuestas a continuación.

El equipo y sus componentes (excepto los artículos consumibles necesarios para la operación) cuentan con una garantía de 24 meses de duración a partir de la fecha de entrega y una responsabilidad de diseño de 3 años, con excepción del desgaste normal, extensible a la firma de un contrato de servicio con la empresa instaladora.

La vida útil de estos equipos se estima en veinte años. Esta estimación por supuesto depende de la correcta utilización y mantenimiento de los equipos de acuerdo con las instrucciones que son suministradas por el proveedor, y siempre que sea manejado por personal capacitado y en posesión de un certificado de formación adecuado reconocido. La sustitución de todos los repuestos y consumibles necesarios debe realizarse con componentes originales y homologados.

La empresa instaladora garantiza durante los 20 años de vida útil del equipo instalado, la disponibilidad de recambios y piezas de sustitución necesarias para el óptimo funcionamiento del mismo, aún en el caso de que el equipo instalado se hubiera dejado de fabricar.

Garantía de la solera: 3.000 cremaciones

Garantía del refractario total: 10 años

3 PLAZOS

El proveedor se compromete a cumplir los plazos estipulados a continuación.

3.1 PLAZOS DE FABRICACIÓN

Basándose en el tiempo actual de fabricación, se estiman los siguientes tiempos de fabricación para el equipo propuesto:

Acción	Tiempo desde el pedido (semanas)
Entrega de materiales	22-24
Horno construido	24-26
Horno completamente operativo	38-40

Si el proveedor, por causas imputables a él incumpliera con los plazos que figuran en el párrafo anterior, deberá abonar al cliente en concepto de cláusula penal la suma de 2000€ (dos mil euros) por cada semana que transcurra entre la fecha prevista y la fecha en la que se ponga en marcha la instalación. El pago de la pena no sustituirá a la indemnización de daños y perjuicios causados y al abono de intereses.

3.2 CONDICIONES DE PAGO

Los términos de pago están aceptados mutuamente entre las dos partes, y seguirán las siguientes formas de pagos:

- 25% a la firma del contrato.
- 40% a la entrega del horno crematorio.
- 30% conclusión de la instalación.
- 5% conclusión Oficial de la instalación.

Las condiciones de pago se harán de conformidad con los términos del contratista.

4 EXCLUSIONES

Se excluyen del presente contrato los conceptos que figuran a continuación.

Se excluye cualquier obra civil o de apoyo. Estas deben ser proporcionadas de forma gratuita por el cliente y/o el contratista principal, e incluirán, sin limitaciones:

- Eliminación de todos los hornos crematorios y equipos existentes.
- Acceso sin restricciones para permitir la entrega del horno crematorio.
- Cimentaciones necesarias para los hornos crematorios y equipos de filtración.
- Previsión de un buen acceso a la descarga para un vehículo pesado.
- Previsión de la entrada por acceso lateral para entregar los equipos al horno crematorio. Resistencia del forjado suficiente para el tránsito rodado de los equipos.
- Previsión de la cimentación para el suelo de un equipo adecuado para la carga de féretros en el horno.
- Previsión de tomas de corriente eléctrica temporal o permanente a los nuevos armarios eléctricos, y suministro de agua potable.
- Previsión de suministro de gas natural al horno crematorio de la acometida del edificio, y conexión física al nuevo horno crematorio.
- Suministro del sistema de recuperación de calor en el sistema de filtración.
- Coste de actualización de cualquiera de los suministros públicos a la construcción, todos los costes asociados con el aumento de la capacidad eléctrica y el suministro de gas natural dentro de la sala técnica donde se encuentra el equipo.

- Cualquier coste de suministro (gas, electricidad y agua) consumida por los técnicos de la empresa instaladora durante la fase de puesta en marcha y formación del proyecto.
- Suministro de consumibles y/o partes importantes para el Horno.
- Suministro de mantenimiento/ servicio durante el periodo de garantía, a no ser bajo contrato aparte.
- Pruebas de aceptación medio-ambiental de la planta después de la instalación y puesta en marcha.
- Sistema de ventilación del crematorio.
- Obtención de las aprobaciones locales asociadas con el diseño del edificio, o la aprobación oficial del departamento de bomberos.
- Cualquier tarea de limpieza de las salas Técnicas y horno crematorio después de la finalización de la instalación.
- Suministro del equipo de emergencia de generación de energía (generador diésel) para su uso durante fallos de energía y todo el equipo necesario para garantizar el tiro de la chimenea en esta situación.
- Nuestras propuestas se basan en la capacidad de trabajar fines de semana y días necesarios, normalmente de 12 horas. Trabajos ruidosos no se llevarán a cabo durante las horas de cremación sin notificación previa y desacuerdo con el cliente.
- No se ha incluido ningún acabado decorativo con nuestros suministros.

5 OBLIGACIONES DEL PROVEEDOR

Serán obligaciones del proveedor, independientemente de las restantes previstas en el presente contrato, las siguientes:

- Suministro de medios auxiliares para la descarga y colocación de los productos y materiales necesarios para la instalación del horno.
- Obligaciones fiscales y laborales: la responsabilidad laboral y en materia de Seguridad y Salud Laboral del proveedor con los trabajadores adscritos a la prestación del acuerdo, será estrictamente de este, por tanto, quedará excluido de cualquier responsabilidad por estas circunstancias. Para la realización de los trabajos objeto del presente acuerdo, el proveedor utilizará su propio personal, quien realizará sus funciones siguiendo las instrucciones que reciba del mismo, en consonancia con las obligaciones asumidas por éste con el cliente en el presente contrato.

El proveedor se obliga a estar al corriente del pago de salarios y de cotizaciones a la Seguridad Social del personal afecto a este acuerdo, así como al cumplimiento de las obligaciones a efectos fiscales.

- Obligaciones desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales: de acuerdo con lo establecido en la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, relativo a la Información, Consulta y Participación de los trabajadores, y con el fin de dar cumplimiento al deber de protección establecido en la presente Ley, el proveedor adoptará las medidas adecuadas para que los trabajadores, pertenecientes a su empresa o a empresas que pueda haber subcontratado y que realicen trabajos en la edificación del cliente reciban toda la información necesaria en relación con:

- a) Los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores en el trabajo.
- b) Las medidas y actividades de protección y prevención aplicadas a los riesgos detectados en el trabajo.

c) Las medidas a adoptar en materia de primeros auxilios, lucha contra incendios y evacuación de los trabajadores, derivadas del análisis de las posibles situaciones de emergencia.

Asimismo el proveedor se compromete a garantizar que cada trabajador reciba una formación suficiente y adecuada en materia preventiva y es responsable de la vigilancia de la salud de aquellos trabajadores, perteneciente a su empresa o a empresas que pueda haber subcontratado, previa autorización expresa y por escrito del cliente, que presten servicios durante la instalación y puesta en marcha del horno y sistema de depuración de gases, considerándolos aptos para el desarrollo de su actividad en función de su puesto de trabajo.

6 RESPONSABILIDAD POR DAÑOS A TERCEROS

Serán de cuenta del proveedor todos los daños que se causen a terceros, como consecuencia de la ejecución de la instalación y más concretamente en lo que se refiere a posibles daños en el edificio, viales, aceras, farolas y demás elementos circundantes a la obra. Deberá suscribir una póliza de riesgo que cubra dichos daños con una compañía de seguros de primer orden con un mínimo de cobertura de 500.000 euros. Copia de dicha póliza deberá entregarse al cliente antes del inicio de la descarga del horno, sistema de depuración de gases y en general de los materiales necesarios para la instalación, con entrega igualmente de los recibos de prima abonados.

7 RETRASOS O SUSPENSIONES

Si por causas imputables al cliente se produjesen retrasos en la instalación, el proveedor quedará facultado para notificarle su estimación del impacto o incidencia que pudieran tener, obligándose el cliente, a establecer de mutuo acuerdo con el proveedor, un ajuste equitativo de los plazos de entrega.

Si el proveedor por causas imputables a él, no consiguiera poner en marcha la instalación dentro del plazo pactado en el presente documento, deberá abonar al cliente en concepto de cláusula penal la suma de 2.000 euros (dos mil euros) por cada semana que transcurra entre la fecha prevista y la fecha en la que se ponga en marcha la instalación. El pago de la pena no sustituirá a la indemnización de daños y perjuicios causados y al abono de intereses.

8 CAUSAS DE RESOLUCIÓN DEL CONTRATO

Son causas de resolución del contrato:

- El incumplimiento, por cualquiera de las partes, de las obligaciones asumidas en el presente contrato.
- La suspensión definitiva de la ejecución de la instalación o la temporal por un plazo superior a tres meses imputable al proveedor, así como la paralización de hecho, definitiva o temporal, por dicho plazo, por actos u omisiones imputables al cliente o al proveedor, siempre que no existan acuerdos en relación con lo previsto en la cláusula anterior.
- El incumplimiento de pago según lo convenido en este contrato.
- El mutuo acuerdo de las partes con los efectos que en él se establezcan.

9 CLÁUSULA DEL CONTRATO

Durante la ejecución de los trabajos el personal del proveedor tendrá prohibido el acceso a datos personales. En este sentido el proveedor se compromete a divulgar dicha prohibición entre los empleados, junto con obligación de guardar secreto respecto a los datos que el personal hubiera podido conocer con motivo de la realización de los trabajos encomendados.

- Prohibición de acceder a los datos de carácter personal. El personal del proveedor tiene prohibido, terminantemente, el acceso a los datos personales, contenidos en los diferentes soportes, informático o en papel, así como en los recursos del sistema de información, para la realización del trabajo encomendado.

En caso de haber tenido un acceso o conocimiento, directo o indirecto, de datos personales tratados por el cliente, estarán a lo dispuesto en el siguiente párrafo.

- Deber de secreto. Si por motivo de la realización del trabajo, el personal del proveedor hubiere tenido acceso o conocimiento, directo o indirecto, de datos de carácter personal responsabilidad del cliente, tendrá la obligación de mantener el deber de secreto respecto a la información accedida, aun después de haber cesado su relación laboral con el proveedor.

Es obligación de este último, comunicar este deber a su personal, así como cuidar de su cumplimiento.

En el caso de que el personal del proveedor incumpla con el deber de secreto, efectuare una cesión o comunicación de los datos personales a terceros (entendiendo ésta como la revelación de datos personales a persona distinta del titular de los datos), o los utilizase para cualquier otro menester, a los efectos de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, el proveedor será considerado como Responsable de Fichero o Tratamiento, respondiendo así, de las infracciones previstas y fijadas en la citada norma.

10 CONDICIONES ESPECIALES

Las siguientes condiciones prevalecerán sobre cualquier otra recogida en este contrato:

- El proveedor está obligado a suministrar una chimenea que cumpla las especificaciones recogidas en la Orden de 18 de octubre de 1976, de Prevención y Corrección de la Contaminación Atmosférica de Origen Industrial. No se incluye el suministro de plataformas fijas necesarias para el acceso a la/s toma/s de muestras necesarias para el cumplimiento de la mencionada norma.
- Las especificaciones y condiciones recogidas en la Autorización de Emisiones a la Atmósfera concedida por la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria para el crematorio en el polígono industrial Los Tá-nagos, deberán ser tenidas en cuenta por el proveedor durante el diseño, ejecución y puesta en marcha de la instalación. El proveedor garantiza al cliente el cumplimiento de todas las exigencias que en la referida autorización se especifican.
- En relación con la Autorización de Emisiones a la Atmósfera referenciada en el párrafo anterior, en el caso de que se supere alguno de los límites de emisión contenidos en la autorización, el proveedor, como parte de su servicio posventa, deberá colaborar activamente y de forma inmediata con el cliente para realizar un informe en el que se determinen las causas que originaron dicha superación, realizando el proveedor a su cargo en el plazo de 1 mes las mejoras necesarias para evitar que se produzcan de nuevo situaciones similares. En cualquier caso el proveedor podrá solicitar una prórroga del plazo para ejecutar las mejoras. Dichas mejoras serán a cargo del cliente cuando haya quedado demostrado que el incumplimiento de los límites se haya debido a una deficiente operación de la instalación por parte del cliente o a un deficiente o inexistente mantenimiento.
- En el hipotético caso de que el Gobierno de Cantabria o la Administración competente en la materia exija una medición extraordinaria de con-

taminantes que evidencia que se han subsanado las causas que originaron dicho incumplimiento, el coste efectivo de dichas mediciones será subsanado por el proveedor, sin cargo alguno para el cliente, salvo que el incumplimiento de los límites se haya debido a una deficiente operación de la instalación por parte del cliente o a un deficiente o inexistente mantenimiento.

- El proveedor no iniciará la producción del horno, sistema de depuración de gases y resto de elementos del sistema hasta la firma del contrato (fecha en la que se debe abonar al proveedor la cantidad previamente especificada). Si antes de esa fecha el proveedor tuviera la certeza de que, por cualquier motivo ajeno a su voluntad, no se va a permitir la puesta en marcha de la instalación, bien por el Gobierno de Cantabria o bien por el Ayuntamiento de Val de San Vicente, podrá rescindir el contrato de manera unilateral, perdiendo únicamente el primer pago del 25% del presupuesto de la instalación.

-En el hipotético caso de que, tras la fecha de inicio de la producción, esto es, la fecha de firma del contrato, el proveedor conociera que el Ayuntamiento o el Gobierno de Cantabria retiraran la licencia del crematorio, Autorización de Emisiones o no vayan a permitir la puesta en marcha de la instalación, el proveedor facturará únicamente al cliente el 80% del presupuesto, quedando las cantidades pendientes de facturar hasta que se realice la instalación en el lugar alternativo indicado por el cliente. En cualquier caso el proveedor deberá remitir el horno, sistema de depuración de gases y demás elementos del sistema/instalación al lugar de España indicado por el cliente, para su custodia.

-Dado que el cliente, una vez seleccionado el proveedor que va a ejecutar la instalación, tiene que presentar al Gobierno de Cantabria un anexo de modificación al proyecto donde se recojan los cambios tanto en el diseño del horno, combustible y la incorporación del sistema depuración de gases, el proveedor deberá colaborar con el cliente facilitando todos los pla-

nos e información adicional, técnica o no técnica, que sea requerida a fin de completar dicho anexo de modificación al proyecto.

-Las especificaciones facilitadas por el proveedor durante la fase de selección de la mejor oferta para la instalación, y que forman parte de este contrato, prevalecerán sobre el resto de especificaciones en el caso de que resulten más favorables para el cliente, prevaleciendo incluso sobre el resto de información contenida en el cuerpo de este contrato o resto de anexos.

-El personal del proveedor que intervenga en la instalación deberá hablar un castellano fluido o, alternativamente, éste deberá facilitar los intérpretes que sean necesarios para facilitar una coordinación adecuada con la dirección de la obra.

-En el caso de que los elementos filtrantes, solera o refractario del horno se deterioraran antes del período garantizado en el presente contrato, el proveedor deberá, sin coste para el cliente, repararlos e incluso sustituirlos totalmente cuando el deterioro sea generalizado, grave o anormal.

11 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

11.1 LADRILLO REFRACTARIO

El ladrillo refractario que se empleará deberá tener unas dimensiones de 7 cm x 11,5 cm x 22 cm. Su conductividad térmica en el rango de temperaturas en las que trabaja el horno (850°C – 1100°C) deberá ser de al menos 1 W/m K mientras que su calor específico será de al menos 1100 J/kg K. Además, su temperatura máxima operativa deberá ser de al menos 1400°C.

Deberán emplearse ladrillos con alto contenido en alúmina, siendo el porcentaje de alúmina de al menos un 50 %. Su densidad será de al menos 2000 kg/m³.

11.2 MATERIAL AISLANTE

El material aislante deberá pertenecer a la marca comercial ISO-AL.

Se tratará de paneles rígidos de 9 cm de espesor para el horno y de 4 cm de espesor para la chimenea, cuya composición es la siguiente:

SiO₂ aprox. 50-80%

SiC aprox. 10-30%

Otros aprox. 1-5%

Su densidad varía entre los 250 y los 400 kg/m³, y su conductividad térmica es de 0,04 W/m K a la temperatura de trabajo del horno.

11.3 LÁMINA DE ACERO

Como recubrimiento externo del horno se emplearán láminas de acero al carbono. Su espesor deberá ser de al menos 1 cm y se unirán por soldadura.

11.4 MORTERO REFRACTARIO

Se empleará mortero refractario para colocar los ladrillos refractarios de alta alúmina. Su temperatura máxima operativa deberá ser de al menos 1400°C. El porcentaje de alúmina deberá ser de al menos el 50 %. Así, el mortero deberá estar compuesto por cemento aluminoso y áridos especiales.

11.5 CHIMENEA DE ACERO INOXIDABLE

La chimenea se construirá con piezas prefabricadas de acero inoxidable, de forma cilíndrica y con un diámetro interior de 42,98 cm y exterior 44,98 cm.

11.6 PUERTA

La puerta de entrada al horno por donde se introducirá el ataúd tendrá unas dimensiones de 100 cm de ancho por 70 cm de alto. Para su construcción se emplearán los mismos materiales y espesores que en las paredes exteriores del horno. Además, se instalará un sistema hidráulico que permitirá la apertura automática de la puerta. Este sistema deberá ser capaz de soportar al menos 400 kg.

La puerta contará en su centro con una pantalla térmica de 15 cm de diámetro, que deberá soportar temperaturas de al menos 1100°C y permitir al operario observar el interior de la cámara principal. La temperatura de la pantalla en el lado externo deberá ser inferior a 60°C en todo momento.

Se aprovechará el orificio de la pantalla térmica para instalar una célula fotovoltaica programable que deberá ajustarse para detectar si existe una llama en el interior de la cámara principal.

11.7 QUEMADORES

Se instalarán dos quemadores presurizados de una marcha, uno en la cámara principal y otro en la secundaria, en los orificios de 15 cm de diá-

metro dispuestos para tal fin, en los cuales se deberán poder acoplar. Ambos serán quemadores de gas y deberán proporcionar una potencia de al menos 290 kW uno y 145 kW el otro. Los quemadores deberán cumplir con las normas de gas vigente y con la norma UNE-EN 746-2:2011 de requisitos de seguridad para la combustión y los sistemas de manejo de combustibles. Contarán con encendido electrónico y con ventilador incluido, de modo que la combustión se lleve a cabo con un 60 % de exceso de aire. Estos quemadores se fijarán mecánicamente a una placa de sujeción, que se soldará a la capa externa del horno.

11.8 SUMINISTRO DEL COMBUSTIBLE

El suministro de combustible deberá realizarse mediante acometidas a la red de suministro con la que dispone el polígono industrial. Deberá tener capacidad para suministrar gas natural a los quemadores de forma que estos puedan desarrollar su máxima potencia.

11.9 VENTILADORES

Se instalarán dos ventiladores. El ventilador de realimentación se instalará para permitir la realimentación en el horno con gases procedentes de la chimenea, y deberá tener una potencia de al menos 0,56 kW para impulsar un máximo de 0,1 kg/s con una caída de presión de 929,8 Pa. Además, deberá ser capaz de soportar temperaturas de hasta 1100°C. El ventilador que tomará aire del ambiente para después mezclarlo con los gases de realimentación deberá tener una potencia de al menos 0,016 kW, para impulsar un máximo de 0,1 kg/s con una caída de presión de 161,55 Pa.

11.10 CONDUCTOS DE VENTILACIÓN

Los conductos de ventilación por los que circulan los gases calientes que son captados en la chimenea y reconducidos de nuevo al horno se construirán con los mismos materiales que la chimenea. Su diámetro interior será de 10 cm.

11.11 TERMOPAR

Se instalarán 2 termopares tipo K capaces de medir temperaturas de al menos 1372°C en los orificios practicados con tal propósito en la cámara principal y en la cámara secundaria. Estos termopares deberán tener un aislamiento cerámico que les permita soportar temperaturas de al menos 1372°C.

11.12 CAUDALÍMETRO

Se instalará un caudalímetro de alta resistencia para gases en el punto de unión entre el horno y la chimenea. El caudalímetro deberá ser de alta resistencia y capaz de soportar temperaturas de al menos 1100°C. Deberá tener conexión electrónica y proporcionar valores de caudal y de velocidad de los gases.

11.13 REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR

Regulador para medición y regulación de la presión diferencial, con un rango de medición hasta al menos 15 mbar y una sobrepresión máxima de al menos 20 mbar. La resolución será como mínimo de 0,01 mbar. El regulador deberá tener una temperatura operativa superior a 1096°C.

11.14 VÁLVULA MODULADORA DE CONTROL

Se instalarán tres válvulas idénticas de control en los conductos de ventilación. Deberán ser capaces de soportar una temperatura de al menos 1000°C, y permitir la abertura o cierre progresivo de forma automática.

11.15 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

El Controlador Lógico Programable que se empleará deberá tener un diseño compacto y contar con al menos 30 entradas digitales y 30 salidas digitales. Deberá instalarse en él el programa informático para el control del horno suministrado por el proveedor.

11.16 MECANISMOS DE SEGURIDAD

Se deberán instalar dos relés de seguridad, cada uno en el suministro a uno de los quemadores. Los relés deberán ser configurables mediante software.

Se deberá instalar un enclavamiento eléctrico que se configure de tal manera que impida la abertura de la puerta del horno cuando en el interior se esté realizando una cremación que no haya finalizado aún.

También se instalará un conmutador que apagará los quemadores cuando el regulador de presión transductor detecte presiones por debajo de las establecidas.

PRESUPUESTO

ÍNDICE

1 UNIDADES DE OBRA	2
1.1 m² DE LADRILLO REFRACTARIO	2
1.2 m² DE PANEL AISLANTE EN EL HORNO	2
1.3 m² DE HOJA DE ACERO	3
1.4 m CHIMENEA	4
1.5 INSTALACIÓN DE PUERTA	5
1.6 INSTALACIÓN DEL QUEMADOR DE LA CÁMARA PRINCIPAL	6
1.7 INSTALACIÓN DEL QUEMADOR DE LA CÁMARA SECUNDARIA 8	
1.8 INSTALACIÓN DE TERMOPAR	9
1.9 m CONDUCTO DE VENTILACIÓN	10
1.10 INSTALACIÓN DE VENTILADOR DE REALIMENTACIÓN	10
1.11 INSTALACIÓN DE VENTILADOR ADICIONAL	11
1.12 INSTALACIÓN DE VÁLVULA MODULADORA	12
1.13 INSTALACIÓN DE REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR	13
1.14 INSTALACIÓN DE CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE .13	
1.15 INSTALACIÓN DE RELÉ DE SEGURIDAD	14
1.16 INSTALACIÓN DE ENCLAVAMIENTO ELÉCTRICO	15
1.17 INSTALACIÓN DE CONMUTADOR	16
1.18 INSTALACIÓN DE CAUDALÍMETRO	16
2 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	18
3 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	20
4 PRESUPUESTO PARA EL CONOCIMIENTO DE LA ADMINISTRACIÓN	21

1 UNIDADES DE OBRA

1.1 m² DE LADRILLO REFRACTARIO

Descripción: muro de ladrillo refractario de 115 mm de espesor colocado con mortero refractario.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ladrillo refractario	unidades	70	1,54	107,8
Mortero refractario	kg	38,67	1,6	61,87
Importe total de materiales (€)				169,67

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	1,42	16,13	22,91
Oficial 1 ^a	horas	1,42	17,82	25,31
Importe total de mano de obra (€)				48,22

Coste total (€)	217,89
-----------------	--------

1.2 m² DE PANEL AISLANTE EN EL HORNO

Descripción: aislamiento térmico por el exterior en muro para revestir el horno formado por panel semirrígido de ISO-AL, de 90 mm de espesor.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Panel ISO-AL 90 mm	m ²	1	111,98	111,98
Importe total de materiales (€)				111,98

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,24	16,13	3,87
Oficial 1 ^a	horas	0,24	17,82	4,28
Importe total de mano de obra (€)				8,15

Coste total (€)	120,13
-----------------	--------

1.3 m² DE HOJA DE ACERO

Descripción: hoja exterior de muro del horno de láminas de acero al carbono de 10 mm de espesor unidas por soldadura.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Lámina de acero al car- bono 10 mm	m ²	1	20,24	20,24
Importe total de materiales (€)				20,24

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,2	16,13	3,23
Oficial 1ª	horas	0,2	17,82	3,56
Importe total de mano de obra (€)				6,79

Coste total (€)	27,03
-----------------	-------

1.4 m CHIMENEA

Descripción: chimenea modular metálica con pared de acero inoxidable de 429,8 mm de diámetro interior y espesor de 10 mm, con aislamiento interno ISO-AL de 70 mm de espesor.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Tubo de acero inoxidable	m	1	81,04	81,04
Panel ISO-AL 70 mm	m	1	63,72	63,72
Subestructura soporte para chimenea	m	1	95,78	95,78
Importe total de materiales (€)				240,54

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,96	16,13	15,48
Oficial 1ª	horas	0,96	17,82	17,11
Importe total de mano de obra (€)				32,59

Coste total (€)	273,13
-----------------	--------

1.5 INSTALACIÓN DE PUERTA

Descripción: instalación de la puerta del horno, de dimensiones 100 cm x 70 cm y de espesor y composición idéntica al resto del horno, con un sistema hidráulico de apertura automática capaz de soportar el peso de la puerta, pantalla térmica y célula fotovoltaica.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ladrillo refractario	unidades	56	1,54	86,24
Mortero refractario	kg	31,67	1,6	50,67
Panel ISO-AL 90 mm	m ²	0,7	111,98	78,39
Lámina de acero al carbono 10 mm	m ²	0,7	20,24	14,17
Pantalla térmica	unidades	1	176,3	176,3

ca 15 cm de diámetro				
Célula fotovoltaica	unidades	1	19,24	19,24
Sistema hidráulico	unidades	1	1520	1520
Importe total de materiales (€)				1945,01

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	4,5	16,13	72,59
Oficial 1 ^a	horas	4,5	17,82	80,19
Importe total de mano de obra (€)				152,78

Coste total (€)	2097,79
-----------------	---------

1.6 INSTALACIÓN DEL QUEMADOR DE LA CÁMARA PRINCIPAL

Descripción: instalación de un quemador presurizado de una marcha para gas, de potencia máxima de 290 kW. Con encendido electrónico y ventilador integrado de 0,24 kW con un rendimiento del 75%. Fijado mecánicamente a placa de sujeción.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Quemador 290 kW	unidades	1	4110	4110
Válvula de seguridad, de latón, de ½" de diámetro	unidades	1	8,42	8,42
Puesta en marcha del quemador	unidades	1	300	300
Fijación mecánica	unidades	4	0,4	1,6
Placa de sujeción	unidades	1	10,12	10,12
Importe total de materiales (€)				4430,14

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	4,05	16,13	65,33
Oficial 1ª	horas	4,05	17,82	72,17
Importe total de mano de obra (€)				137,5

Coste total (€)	4567,64
-----------------	---------

1.7 INSTALACIÓN DEL QUEMADOR DE LA CÁMARA SECUNDARIA

Descripción: instalación de un quemador presurizado de una marcha para gas, de potencia máxima de 145 kW. Con encendido electrónico y ventilador integrado de 0,092 kW con un rendimiento del 75%. Fijado mecánicamente a placa de sujeción.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Quemador 145 kW	unidades	1	3490	3490
Válvula de seguridad, de latón, de ½" de diámetro	unidades	1	8,42	8,42
Puesta en marcha del quemador	unidades	1	300	300
Fijación mecánica	unidades	4	0,4	1,6
Placa de sujeción	unidades	1	10,12	10,12
Importe total de materiales (€)				3810,14

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	4,05	16,13	65,33
Oficial 1ª	horas	4,05	17,82	72,17
Importe total de mano de obra (€)				137,5

Coste total (€)	3947,64
-----------------	---------

1.8 INSTALACIÓN DE TERMOPAR

Descripción: instalación de un termopar tipo K con aislamiento cerámico y con una temperatura de trabajo de al menos 1372 °C.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Termopar tipo K	unidades	1	39,45	39,45
Importe total de materiales (€)				39,45

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	1,26	16,13	20,32
Oficial 1ª	horas	1,26	17,82	22,45
Importe total de mano de obra (€)				42,77

Coste total (€)	82,22
-----------------	-------

1.9 m CONDUCTO DE VENTILACIÓN

Descripción: conducto de ventilación del sistema de realimentación, que se fabrica con los mismos materiales que la chimenea y con un diámetro interior de 10 cm.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Conducto de ventilación	m	1	85,38	85,38
Importe total de materiales (€)				85,38

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,4	16,13	6,45
Oficial 1ª	horas	0,4	17,82	7,13
Importe total de mano de obra (€)				13,58

Coste total (€)	98,96
-----------------	-------

1.10 INSTALACIÓN DE VENTILADOR DE REALIMENTACIÓN

Descripción: instalación del ventilador de realimentación de 0,56 kW con un rendimiento del 75% y resistente a altas temperaturas.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ventilador 0,56 kW	unidades	1	95,67	191,34
Importe total de materiales (€)				191,34

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,72	16,13	11,61
Oficial 1ª	horas	0,72	17,82	12,83
Importe total de mano de obra (€)				24,44

Coste total (€)	215,78
-----------------	--------

1.11 INSTALACIÓN DE VENTILADOR ADICIONAL

Descripción: instalación del ventilador que tomará aire del ambiente para después mezclarlo con los gases de realimentación. Deberá tener una potencia de al menos 0,016 kW con un rendimiento del 75%.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ventilador 0,016 kW	unidades	1	29,99	29,99
Importe total de materiales (€)				29,99

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,6	16,13	9,68
Oficial 1 ^a	horas	0,6	17,82	10,69
Importe total de mano de obra (€)				20,37

Coste total (€)	50,36
-----------------	-------

1.12 INSTALACIÓN DE VÁLVULA MODULADORA

Descripción: instalación de válvula moduladora de control en conducto de ventilación.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Válvula moduladora	unidades	1	25,9	25,9
Importe total de materiales (€)				25,9

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,38	16,13	6,13
Oficial 1 ^a	horas	0,38	17,82	6,77
Importe total de mano de obra (€)				12,9

Coste total (€)	38,8
-----------------	------

1.13 INSTALACIÓN DE REGULADOR DE PRESIÓN TRANSDUCTOR

Descripción: instalación de regulador de presión transductor que cumpla con las características especificadas.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Regulador de presión transductor	unidades	1	176,26	176,26
Importe total de materiales (€)				176,26

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,55	16,13	8,87
Oficial 1ª	horas	0,55	17,82	9,8
Importe total de mano de obra (€)				18,67

Coste total (€)	194,93
-----------------	--------

1.14 INSTALACIÓN DE CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Descripción: instalación de Controlador Lógico Programable y del programa informático del proveedor.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Controlador Lógico Programable	unidades	1	728,28	728,28
Importe total de materiales (€)				728,28

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	2,88	16,13	46,45
Oficial 1ª	horas	2,88	17,82	51,32
Importe total de mano de obra (€)				97,77

Coste total (€)	826,05
-----------------	--------

1.15 INSTALACIÓN DE RELÉ DE SEGURIDAD

Descripción: instalación de relé de seguridad para quemador, y configuración electrónica.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Relé de seguridad	unidades	1	47,5	47,5
Importe total de materiales (€)				47,5

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,26	16,13	4,19
Oficial 1ª	horas	0,26	17,82	4,63
Importe total de mano de obra (€)				8,82

Coste total (€)	56,32
-----------------	-------

1.16 INSTALACIÓN DE ENCLAVAMIENTO ELÉCTRICO

Descripción: instalación de enclavamiento eléctrico en la puerta del horno.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Enclavamiento eléctrico	unidades	1	15,67	15,67
Importe total de materiales (€)				15,67

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,19	16,13	3,06
Oficial 1ª	horas	0,19	17,82	3,39
Importe total de mano de obra (€)				6,45

Coste total (€)	22,12
-----------------	-------

1.17 INSTALACIÓN DE CONMUTADOR

Descripción: instalación de un conmutador para el apagado de emergencia del horno.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Conmutador	unidades	1	5,25	5,25
Importe total de materiales (€)				5,25

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	0,15	16,13	2,42
Oficial 1ª	horas	0,15	17,82	2,67
Importe total de mano de obra (€)				5,09

Coste total (€)	10,34
-----------------	-------

1.18 INSTALACIÓN DE CAUDALÍMETRO

Descripción: instalación de caudalímetro o regulador de caudal para medición de caudal y velocidad.

Materiales				
Definición	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Caudalímetro	unidades	1	604,25	604,25
Importe total de materiales (€)				604,25

Mano de obra				
Categoría	Ud.	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste (€)
Ayudante	horas	1,12	16,13	18,07
Oficial 1ª	horas	1,12	17,82	19,96
Importe total de mano de obra (€)				38,03

Coste total (€)	642,28
-----------------	--------

2 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Unidad de obra	Ud.	Medición	Precio unitario (€)	Importe (€)
Ladrillo refractario	m ²	50,71	217,89	11049,2
Panel aislante en el horno	m ²	28,99	120,13	3483,17
Hoja de acero	m ²	29,42	27,03	795,22
Chimenea	m	10,5	273,13	2867,87
Instalación de la puerta	unidades	1	2097,79	2097,79
Instalación quemador cámara principal	unidades	1	4567,64	4567,64
Instalación quemador cámara secundaria	Unidades	1	3947,64	3947,64
Instalación de termopar	unidades	2	82,22	82,22
Conducto de ventilación	m	13,11	98,96	1297,37
Instalación de ventilador de realimentación	unidades	1	215,78	215,78
Instalación de ventilador adicional	unidades	1	50,36	50,36

Instalación de válvula moduladora	unidades	3	38,8	116,4
Instalación de regulador de presión transductor	unidades	1	194,93	194,93
Instalación de controlador lógico programable	unidades	1	826,05	826,05
Instalación de relé de seguridad	unidades	2	56,32	112,64
Instalación de enclavamiento eléctrico	unidades	1	22,12	22,12
Instalación de conmutador	unidades	1	10,34	10,34
Instalación de caudalímetro	unidades	1	642,28	642,28

El Presupuesto de Ejecución Material = 32392,24 €

El Presupuesto de Ejecución Material asciende a treinta y dos mil trescientos noventa y dos euros con veinticuatro céntimos.

Santander, 10-7-2015

El ingeniero

3 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Presupuesto de Ejecución Material = 32392,24 €

+ 15% Gastos Generales = 4858,84 €

+ 10% Beneficio = 3239,22 €

+ 21% IVA = 6802,37 €

El Presupuesto de Ejecución por Contrata = 47292,67 €

El Presupuesto de Ejecución por Contrata asciende a cuarenta y siete mil doscientos noventa y dos euros con sesenta y siete céntimos.

Santander, 10-7-2015

El ingeniero

4 PRESUPUESTO PARA EL CONOCIMIENTO DE LA ADMINISTRACIÓN

Presupuesto de Ejecución por Contrata = 47292,67 €

+ Gastos de redacción del proyecto = 4729,27 €

+ Gastos de tramitación del proyecto = 945,85 €

El Presupuesto para el Conocimiento de la Administración = 52967,79 €

El Presupuesto para el Conocimiento de la Administración asciende a cincuenta y dos mil novecientos sesenta y siete euros con setenta y nueve céntimos.

Santander, 10-7-2015

El ingeniero

BIBLIOGRAFÍA

- *Combustibles y refractarios*, J. D. Gilchrist, Editorial Alhambra, S.A.
- *Hornos*, J. D. Gilchrist, Editorial Alhambra, S.A.
- *Guía técnica: diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*, IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- *Fundamentos de transferencia de calor*, Frank P. Incropera & David P. De Witt, Pearson Prentice Hall.
- *Fundamentos de Electro-Óptica para ingenieros*, Glenn D. Boreman.
- *Fundamentos de combustión*, José María Desantes Fernández & Magín Lapuerta Amigó.
- *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*, W.H. Severns.