



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval  
Departamento de Ingeniería Civil, Náutica y Marítima

Trabajo de fin de grado en  
Tecnologías Marinas

**Estudio termo-mecánico de una caldera de  
recuperación en dos condiciones de operación  
límite**

Presentado por  
**Carmen Ara Díaz**

Santa Cruz de Tenerife, 10 de julio de 2024



# Autorización

Pedro Rivero Rodríguez, Profesor Titular de Universidad perteneciente al área de conocimiento de Construcciones Navales del Departamento de *Ingeniería Civil, Náutica y Marítima* de la Universidad de La Laguna hace constar que:

**Carmen Ara Díaz**, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado:

*Estudio termo-mecánico de una caldera de recuperación en dos condiciones de operación límite.*

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea designado.

Para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente documento en Santa Cruz de Tenerife, a 8 de julio de 2024.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez  
-Tutor del trabajo-



# Resumen

En este trabajo de fin de grado se estudian los esfuerzos termo-mecánicos soportados por un generador de vapor de recuperación de un buque en dos condiciones de operación límite. Se han diferenciado en este generador tres partes: zona de gases de escape, zona del quemador y zona de vapor.

En primer lugar, se ha realizado en *FreeCAD* un modelo simplificado en 3D de toda la caldera, prescindiendo de los accesorios que le son propios y que no aportan nada al estudio termomecánico. Además, se ha diferenciado el conjunto de la zona del quemador para su estudio por separado.

En segundo lugar, se han determinado los parámetros necesarios para simular dos escenarios críticos en el funcionamiento de una caldera de recuperación. El primer escenario consiste en considerar el quemador encendido, partiendo de la caldera fría. En el segundo escenario, el vapor se encuentra a su máxima presión y temperatura cuando se enciende el quemador.

Estos parámetros se han usado en el banco de trabajo *FEM*, que hace un estudio mediante el método de elementos finitos, para determinar las deformaciones, esfuerzos y gradientes de temperatura en los elementos simulados. Esto ha permitido hacer un estudio comparativo de los resultados de ambos escenarios.



# Abstract

In this final degree project, the thermo-mechanical stresses endured by a ship's heat recovery steam generator have been studied under two limit operating conditions. This generator has been divided in three parts: the exhaust gas zone, the burner zone, and the steam zone.

Firstly, a simplified 3D model of the entire boiler has been created in *FreeCAD*, excluding accessories that are not relevant to the thermo-mechanical study. Furthermore, the burner has been disgregated from the whole for it's individual study.

Secondly, the necessary parameters have been determined to simulate two critical scenarios in the operation of a heat recovery boiler. The first scenario considers the burner igniting from a cold boiler start. In the second scenario, the steam is at its maximum pressure and temperature when the burner is ignited.

These parameters have been used in the *FEM* workbench, which conducts a study using the finite element method to determine deformations, stresses, and temperature gradients in the simulated elements. This has allowed a comparative study of the results of both scenarios.



# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Revisión y antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Características generales de los generadores de vapor . . . . .	1
1.2. Características generales del generador de vapor de referencia . . . . .	2
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>5</b>
3.1. Planificación . . . . .	5
3.2. Herramienta de trabajo: <i>FreeCAD</i> . . . . .	5
3.2.1. Entornos de trabajo . . . . .	5
3.3. Método de elementos finitos . . . . .	10
3.3.1. Parámetros de la malla . . . . .	12
3.4. Material: acero P265GH . . . . .	12
3.4.1. Propiedades del material . . . . .	12
3.5. Restricciones del análisis . . . . .	16
3.5.1. Restricciones de empotramiento . . . . .	16
3.5.2. Restricciones de temperaturas . . . . .	17
3.5.3. Restricciones de presión . . . . .	17
<b>4. Resultados</b>	<b>21</b>
4.1. Modelo en 3D . . . . .	21
4.2. Análisis termo-mecánico del <i>Escenario 1</i> . . . . .	21
4.2.1. Magnitud del desplazamiento . . . . .	21
4.2.2. Temperatura . . . . .	25
4.2.3. Tensión de Von Mises . . . . .	25
4.2.4. Esfuerzo principal máximo . . . . .	25
4.2.5. Esfuerzo principal mínimo . . . . .	28
4.2.6. Esfuerzo cortante máximo . . . . .	28
4.3. Análisis termo-mecánico del <i>Escenario 2</i> . . . . .	30

---

4.3.1. Magnitud del desplazamiento . . . . .	30
4.3.2. Temperatura . . . . .	30
4.3.3. Tensión de Von Mises . . . . .	35
4.3.4. Esfuerzo principal máximo . . . . .	35
4.3.5. Esfuerzo principal mínimo . . . . .	35
4.3.6. Esfuerzo cortante máximo . . . . .	35
4.4. Resumen de resultados del análisis de ambos escenarios . . . . .	40
4.5. Resultados adicionales . . . . .	40
<b>5. Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>Anexos</b>	<b>49</b>
<b>A. Vistas del modelo 3D de la caldera</b>	<b>49</b>
<b>B. Planos de la caldera con el banco de trabajo <i>TechDraw</i></b>	<b>55</b>
<b>C. Resultados en CCX</b>	<b>59</b>
C.1. Archivo de entrada de CalculiX del <i>Escenario 1</i> . . . . .	59
C.2. Resultados gráficos del <i>Escenario 1</i> . . . . .	61
C.3. Archivo de entrada de CalculiX del <i>Escenario 2</i> . . . . .	61
C.4. Resultados gráficos del <i>Escenario 2</i> . . . . .	65
<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>

# Índice de figuras

3.1. Croquis de los tubos de la zona del quemador. . . . .	6
3.2. Tubos de la zona del quemador extruidos a partir de sus croquis. . . . .	7
3.3. Dependencias del elemento Gasesinf. . . . .	8
3.4. Modelo 3D de la entrada de gases de escape. . . . .	8
3.5. Zona del quemador con todos sus elementos. . . . .	9
3.6. Malla generada por <i>Netgen</i> de primer orden de precisión muy fina. . . . .	11
3.7. Zona del quemador con uno de sus tubos modelado. . . . .	13
3.8. Informe de error debido a precisión insuficiente. . . . .	13
3.9. Informe de error debido a limitaciones de RAM. . . . .	14
3.10. Elementos y parámetros de la malla del análisis por <i>Netgen</i> . . . . .	14
3.11. Parámetros establecidos en la carta del material en el entorno de trabajo <i>FEM</i> . . . . .	15
3.12. Simulador ERS SP25, pantalla del sistema de gas de la caldera auxiliar. Encendido desde el escenario Cold Ship. . . . .	16
3.13. Simulador ERS SP25, pantalla del sistema de gas de la caldera auxiliar. Encendido desde el escenario Ready for Departure. . . . .	17
3.14. Restricciones fijas de la parte superior de la zona del quemador. . . . .	18
3.15. Restricciones fijas de la parte inferior de la zona del quemador. . . . .	18
3.16. Restricción de temperatura en la salida de los gases de escape del quemador. . . . .	19
3.17. Restricción de temperatura en el hogar del quemador. . . . .	19
3.18. Restricción de presión en la zona de vapor. . . . .	20
4.1. Vista isométrica del sólido completo de la caldera. . . . .	22
4.2. Vista isométrica del sólido completo de la caldera con un 50% de transparencia. . . . .	23
4.3. Resultado gráfico de la magnitud del desplazamiento del <i>Escenario 1</i> . . . . .	24
4.4. Resultado gráfico de la temperatura del <i>Escenario 1</i> . . . . .	26
4.5. Resultado gráfico de la tensión de Von Mises del <i>Escenario 1</i> . . . . .	27
4.6. Resultado gráfico de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar del <i>Escenario 1</i> . . . . .	28
4.7. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos del <i>Escenario 1</i> . . . . .	29
4.8. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos de los soportes del hogar del <i>Escenario 1</i> . . . . .	30
4.9. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos del <i>Escenario 1</i> . . . . .	31

4.10. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos del <i>Escenario 1</i> . . . . .	32
4.11. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos de la base del hogar del <i>Escenario 1</i> . . . . .	33
4.12. Resultado gráfico de la magnitud del desplazamiento del <i>Escenario 2</i> . . . . .	33
4.13. Resultado gráfico de la temperatura del <i>Escenario 2</i> . . . . .	34
4.14. Resultado gráfico de la tensión de Von Mises del <i>Escenario 2</i> . . . . .	36
4.15. Resultado gráfico de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar del <i>Escenario 2</i> . . . . .	36
4.16. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos del <i>Escenario 2</i> . . . . .	37
4.17. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos en la base del hogar del <i>Escenario 2</i> . . . . .	37
4.18. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos del <i>Escenario 2</i> . . . . .	38
4.19. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos del <i>Escenario 2</i> . . . . .	39
4.20. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos de la base del hogar del <i>Escenario 2</i> . . . . .	39
4.21. Zona del quemador seccionada. . . . .	41
4.22. Desplazamiento por factor 10 de la zona del quemador seccionada. . . . .	42
4.23. Esfuerzos de Von Mises en la base del quemador seccionada. . . . .	43
4.24. Esfuerzos principales máximos en la base del quemador seccionada. . . . .	43
4.25. Esfuerzos principales mínimos en la base del quemador seccionada. . . . .	44
4.26. Esfuerzos cortantes máximos en la base del quemador seccionada. . . . .	44
A.1. Vista en planta inferior de la caldera. . . . .	50
A.2. Vista en planta superior de la caldera. . . . .	50
A.3. Vista de alzado trasero de la caldera con el ajuste de los sólidos al 50 % de transparencia. . . . .	51
A.4. Vista de perfil izquierdo de la caldera con el ajuste de los sólidos al 50 % de transparencia. . . . .	52
A.5. Entrada de agua desde la cisterna a la caldera. . . . .	53
A.6. Salida de los gases de escape del quemador (arriba) y salida del vapor hacia todo el sistema de calefacción. . . . .	54
C.1. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos de la base del hogar del <i>Escenario 1</i> . . . . .	61
C.2. Resultado gráfico de los esfuerzos de Von Mises ejercidos en el tubo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	62
C.3. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos ejercidos en el tubo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	62
C.4. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos ejercidos en el tubo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	63
C.5. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes ejercidos en el tubo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	63
C.6. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos de la base del hogar del <i>Escenario 2</i> . . . . .	66
C.7. Resultado gráfico de los esfuerzos de Von Mises ejercidos en el tubo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	66
C.8. Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos ejercidos en el tubo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	67
C.9. Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos ejercidos en el tubo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	67
C.10. Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes ejercidos en el tubo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	68

# Índice de tablas

1.1. Principales especificaciones de la caldera de referencia . . . . .	2
3.1. Principales herramientas de <i>Sketcher</i> . . . . .	6
3.2. Principales herramientas de <i>Part</i> en <i>FreeCAD</i> . . . . .	7
3.3. Propiedades mecánicas del material seleccionado para el análisis. . . . .	12
3.4. Propiedades térmicas del material seleccionado para el análisis. . . . .	14
4.1. Datos del resultado de la magnitud del desplazamiento del <i>Escenario 1</i> . . . . .	21
4.2. Datos del resultado de la temperatura del <i>Escenario 1</i> . . . . .	25
4.3. Datos del resultado de la tensión de Von Mises del <i>Escenario 1</i> . . . . .	25
4.4. Datos del resultado del esfuerzo principal máximo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	25
4.5. Datos del resultado del esfuerzo principal mínimo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	28
4.6. Datos del resultado del esfuerzo cortante máximo del <i>Escenario 1</i> . . . . .	28
4.7. Datos del resultado de la magnitud del desplazamiento del <i>Escenario 2</i> . . . . .	30
4.8. Datos del resultado de la temperatura del <i>Escenario 2</i> . . . . .	35
4.9. Datos del resultado de la tensión de Von Mises del <i>Escenario 2</i> . . . . .	35
4.10. Datos del resultado del esfuerzo principal máximo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	35
4.11. Datos del resultado del esfuerzo principal mínimo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	40
4.12. Datos del resultado del esfuerzo cortante máximo del <i>Escenario 2</i> . . . . .	40
4.13. Recopilación de todos los datos obtenidos en ambos escenarios. . . . .	40



# 1 Revisión y antecedentes

Este tema fue seleccionado en parte porque la caldera es un elemento que estuvo muy presente durante mis prácticas a bordo y me gustó ver la cantidad de sistemas que dependían del correcto funcionamiento de esta. Además, el programa de software libre *FreeCAD* me llamaba la atención; estaba interesada en utilizarlo por la variedad de campos en los que puede ser una ventaja conocerlo, ya no solo profesionalmente sino también a nivel personal.

Las calderas marinas modernas están concebidas para la generación de vapor ya sea para la propulsión principal, generación de energía eléctrica, calefacción de tanques y otros servicios auxiliares.

Antiguamente se utilizaban las calderas íntegramente para la propulsión del buque. Sus diseños eran rudimentarios, generaban baja presión y no eran muy eficientes. Posteriormente en la época de 1860 se introdujeron las calderas cilíndricas, lo que mejoró el manejo del vapor a alta presión, permitiendo mayores velocidades y una navegación más eficiente. Luego, se desarrollaron las máquinas de vapor de triple y cuádruple expansión, lo cual aumentaba considerablemente la eficiencia energética y, por tanto, el consumo de combustible. De forma paralela, se desarrollaron calderas más potentes y eficientes. [1]

A lo largo del siglo XX, las calderas fueron adoptando nuevos materiales y métodos de fabricación, que aumentaron su eficiencia y durabilidad. Poco a poco, se fue produciendo la transición de la propulsión mediante turbinas de vapor a motores diésel, ya que estos permitían un control más preciso sobre la combustión y menor consumo de combustible. Sin embargo, el desarrollo de las calderas se siguió produciendo, como parte de los sistemas auxiliares que las necesitan para funcionar. Esta necesidad desencadenó el desarrollo de calderas automatizadas, que facilitaron su operación y aumentaron el rendimiento y la seguridad de las mismas.

Además, asociado a su nuevo rol de equipos auxiliares de una planta propulsora con motores diésel, las calderas incluyen tanto la capacidad de recuperación de calor en los gases de escape, como la posibilidad de quemar combustible en un quemador propio, superando las situaciones de paro de los motores propulsores.

## 1.1 Características generales de los generadores de vapor

Se pueden encontrar dos tipos de calderas según su concepción: acuatubulares o piro-tubulares.

Las calderas acuatubulares se caracterizan por estar formadas por una serie de haces tubulares en los que el agua circula por su interior. Dichos tubos están sometidos a las altas temperaturas de los gases calientes que circulan a su alrededor, que hacen que se caliente el agua del interior de los tubos. Esta circula desde un colector inferior lleno de agua, a través de un banco de tubos hacia el colector superior, evaporándose durante el recorrido ascendente. [8]

Por otra parte, las calderas piro-tubulares tienen una construcción más sencilla y un funcionamiento opuesto al caso anterior. Esta vez, el agua circula por el exterior de un haz de tubos, por cuyo interior circulan los gases. Además, existe un hogar, donde el quemador pulveriza el combustible para mezclarlo con aire y producir la combustión, evaporando el agua que rodea los tubos. [8]

Estas calderas piro-tubulares en ocasiones se diseñan para ir ubicadas en serie con respecto a los gases de escape de los motores principales y/o auxiliares, y aprovechan el calor de los gases de escape para calentar el agua de la caldera. Además, cuando la temperatura de los gases no sea suficiente para abastecer la demanda de vapor, se incorpora un quemador para aportar el calor necesario.

## 1.2 Características generales del generador de vapor de referencia

El generador de vapor que va a ser estudiado es una caldera pirotubular de recuperación. Como ha sido mencionado con anterioridad, este tipo de calderas utilizan el calor de los gases de escape para generar vapor y, aunque no tiene porqué, en este caso la caldera presenta también una zona que genera vapor con un quemador.

Esta caldera está compuesta de tres grandes zonas: la zona de los gases de escape, la zona de vapor y la zona del quemador. La necesidad de tener la posibilidad de generar vapor sin gases de escape se debe a que está pensada para ser instalada en buques; en puerto, sin flujo de gases de escape proveniente de los motores, no podría generar vapor.

Los planos utilizados para la elaboración del modelo en 3D corresponden a una caldera con las siguientes especificaciones:

Propiedad	Valor	unid.
presión de servicio (con gases de escape)	7	bar
presión de servicio (quemador funcionando)	4,5	bar
caudal de vapor producido (quemador)	1200	kg/h
caudal de gases generado	2000	kg/h

**Tabla 1.1:** Principales especificaciones de la caldera de referencia

## 2 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo han sido estructurados en dos grupos:

- Objetivos generales, relacionados con la aplicación de conocimientos previos. Se trata de los siguientes:
  - Entender el funcionamiento en condiciones reales de la caldera objeto de estudio.
  - Identificar las presiones y temperaturas reales de trabajo de una caldera de recuperación en un buque.
  - Obtener información real de planos y manuales e interpretarla para su utilización posterior en los objetivos específicos.
- Objetivos específicos, en los que se pretende profundizar en el conocimiento mediante simulación. Consisten en:
  - Realizar un modelo en 3D de una caldera con el programa de software libre *FreeCAD*.
  - Analizar de forma termo-mecánica una caldera de recuperación empleando el módulo de análisis de elementos finitos *FEM*.
  - Conocer los posibles puntos débiles que se podrían plantear en la estructura en las condiciones límite de operación que se planteen.
  - Comparar dos posibles escenarios críticos en el encendido de una caldera y analizar sus efectos sobre la caldera.



# 3 Metodología

## 3.1 Planificación

La realización de este trabajo se ha organizado principalmente en las siguientes etapas:

- **Búsqueda de información:** Recopilación de datos y documentación relevante sobre calderas de recuperación.
- **Estudio del programa *FreeCAD*:** Aprendizaje y familiarización con las funcionalidades de *FreeCAD* para su aplicación en el modelado y análisis de la estructura de la caldera.
- **Modelado de la caldera:** Creación de un modelo 3D simplificado de la caldera de recuperación utilizando *FreeCAD*.
- **Análisis de los escenarios:** Evaluación de diferentes condiciones operativas y escenarios críticos que podrían afectar al correcto funcionamiento de la caldera.
- **Evaluación y revisión de los resultados:** Verificación de los resultados obtenidos y realización de ajustes necesarios, seguida de una revisión final.

## 3.2 Herramienta de trabajo: *FreeCAD*

*FreeCAD* es un software libre y de código abierto, lo que significa que su código es accesible y modificable por cualquier persona. La evolución de este tipo de software se beneficia de la colaboración pública a lo largo del tiempo [3].

Esta herramienta permite crear elementos tanto en 2D como en 3D, y facilita la exportación para su uso con máquinas *CNC*.

### 3.2.1 Entornos de trabajo

Los entornos de trabajo, o bancos de trabajo, son los subapartados que utiliza *FreeCAD* para organizar sus diversas funciones y herramientas. Aunque algunos bancos de trabajo comparten herramientas, cada uno está enfocado de manera distinta para cumplir con diferentes objetivos.

#### 3.2.1.1 Planos

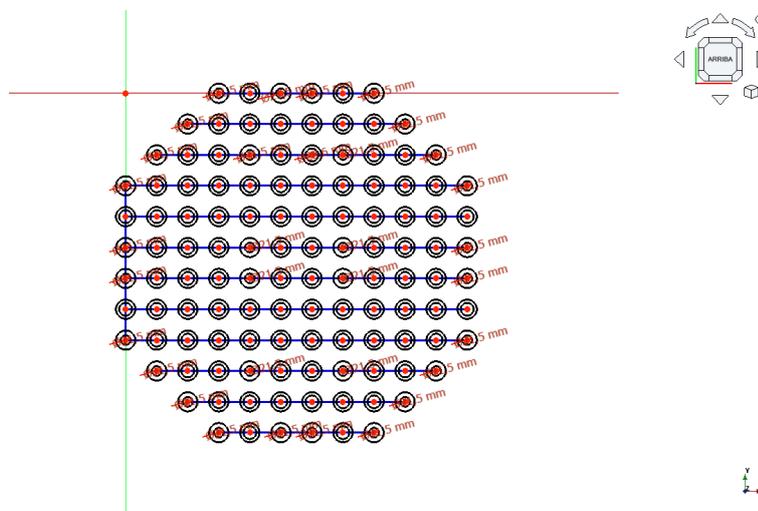
Para crear la base de la caldera, se utilizan los entornos de trabajo *Sketcher* y *Draft* en *FreeCAD*. Ambos son empleados para la creación o modificación de geometrías en 2D. La principal diferencia radica en que *Draft* permite crear elementos en cualquier plano, más allá del XY, YZ y XZ.

En general, todos los planos fueron creados con *Sketcher*, mientras que el entorno *Draft* se utilizó exclusivamente por sus herramientas de matriz. Las principales herramientas empleadas en *Sketcher* se enumeran en la tabla 3.1.

En la figura 3.1 se puede observar el croquis detallado de los tubos ubicados en la sección del quemador. Este croquis fue elaborado como parte del proceso de modelado.

Símbolo	Nombre
	Crear línea
	Crear circunferencia
	Restringir verticalmente
	Restringir horizontalmente
	Restricción de paralelismo
	Restricción perpendicular
	Restricción de distancia horizontal
	Restricción de distancia vertical
	Restringir diámetro

**Tabla 3.1:** Principales herramientas de *Sketcher*.



**Figura 3.1:** Croquis de los tubos de la zona del quemador.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.2 Modelado en 3D

Una vez completados todos los planos de las piezas básicas, se utilizó el entorno de trabajo *Part* en *FreeCAD* para crear piezas tridimensionales más complejas. Las principales herramientas utilizadas en este entorno se detallan en la tabla 3.2.

Este entorno permite realizar operaciones como extruir croquis creados en otros entornos de trabajo (fig. 3.2), operaciones booleanas para combinar formas, y trabajar con cuerpos compuestos. En la figura 3.3 se muestra la secuencia de operaciones realizadas para crear el elemento representado en la figura 3.4.

El estudio se enfoca en el objeto de color mostrado en la figura 3.5. La razón de ello se detalla en el punto 3.3.1.

### 3.2.1.3 Análisis termo-mecánico

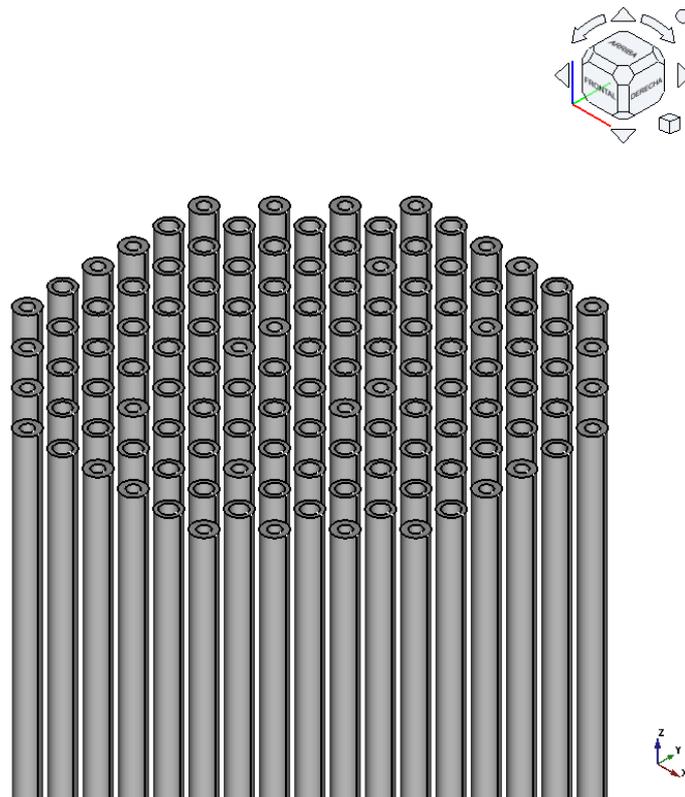
La fase final del proyecto se lleva a cabo en el banco de trabajo *FEM*, utilizando el método de elementos finitos para realizar análisis estáticos y termo-mecánicos de elementos en dos o tres dimensiones, ya sean sólidos o fluidos.

Los pasos utilizados para el análisis termo-mecánico de un sólido en este caso son los siguientes:

1. Creación de un contenedor de análisis con el solucionador estándar *CalculiX*.

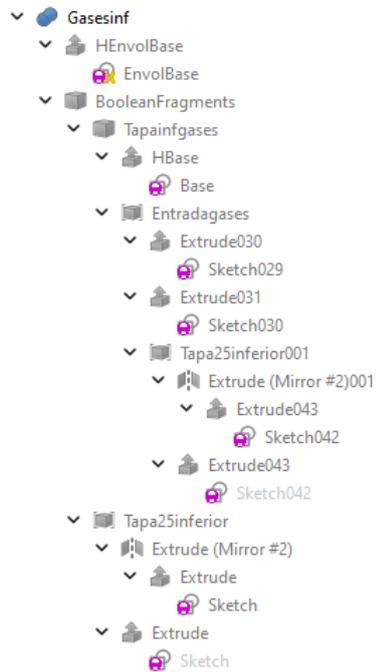
Símbolo	Nombre
	Extruir
	Herramientas compuestas: crear cuerpo compuesto, explotar compuesto, filtrar compuesto
	Operación booleana: unión, intersección, diferencia y sección
	Unir objetos
	Cortar objetos
	Partir objetos

**Tabla 3.2:** Principales herramientas de *Part* en *FreeCAD*.

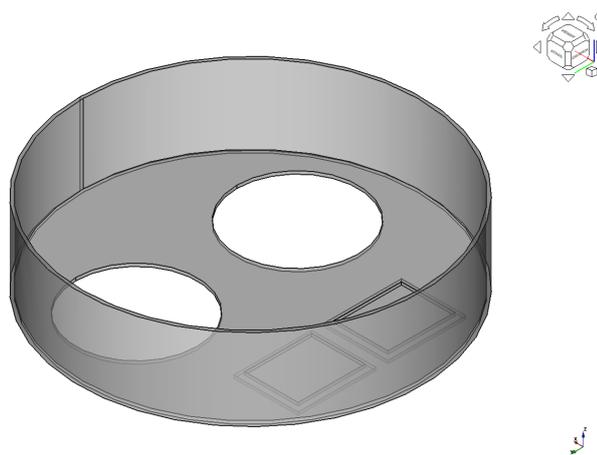


**Figura 3.2:** Tubos de la zona del quemador extruidos a partir de sus croquis.

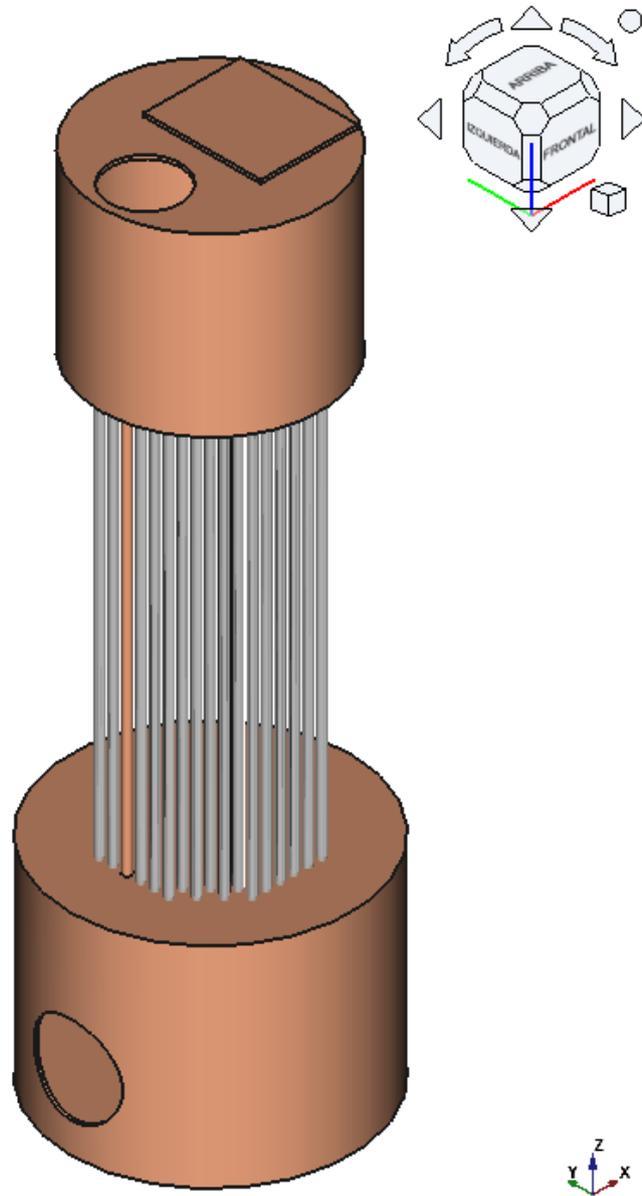
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.3:** Dependencias del elemento Gasesinf.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.4:** Modelo 3D de la entrada de gases de escape.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.5:** Zona del quemador con todos sus elementos.  
Fuente: Elaboración propia

2. Especificación del material del sólido.
3. Aplicación de restricciones mecánicas y térmicas, incluyendo una restricción fija y de temperatura inicial.
4. Generación de una malla *FEM* usando *Netgen*.
5. Escritura y ejecución del solucionador *CalculiX*.
6. Visualización de los resultados en *CCX*.

A continuación se define el significado de los seis resultados de *CCX* que se obtendrán:

- Magnitud de desplazamiento: distancia entre la posición inicial y final del nodo.
- Temperatura: en un sistema, medida relacionada directamente con la energía cinética a nivel atómico o molecular [2].
- Tensión de Von Mises: medida de la resistencia de un material a la deformación plástica [7].
- Esfuerzo principal máximo y mínimo: tensión máxima que resiste un material bajo tracción y compresión [6].
- Esfuerzo cortante máximo: tensión generada por fuerzas opuestas a la superficie, relacionada con el cizallamiento que puede dividir un objeto en dos partes [9].

Superar los valores máximos determinados por el material provocará su deformación permanente y/o su rotura.

Los detalles específicos sobre el proceso en este banco de trabajo se detallan más adelante en los puntos 3.3.1, 3.4.1 y 3.5.

### 3.3 Método de elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (*MEF*) es una técnica de análisis numérico ampliamente utilizada en ingeniería.

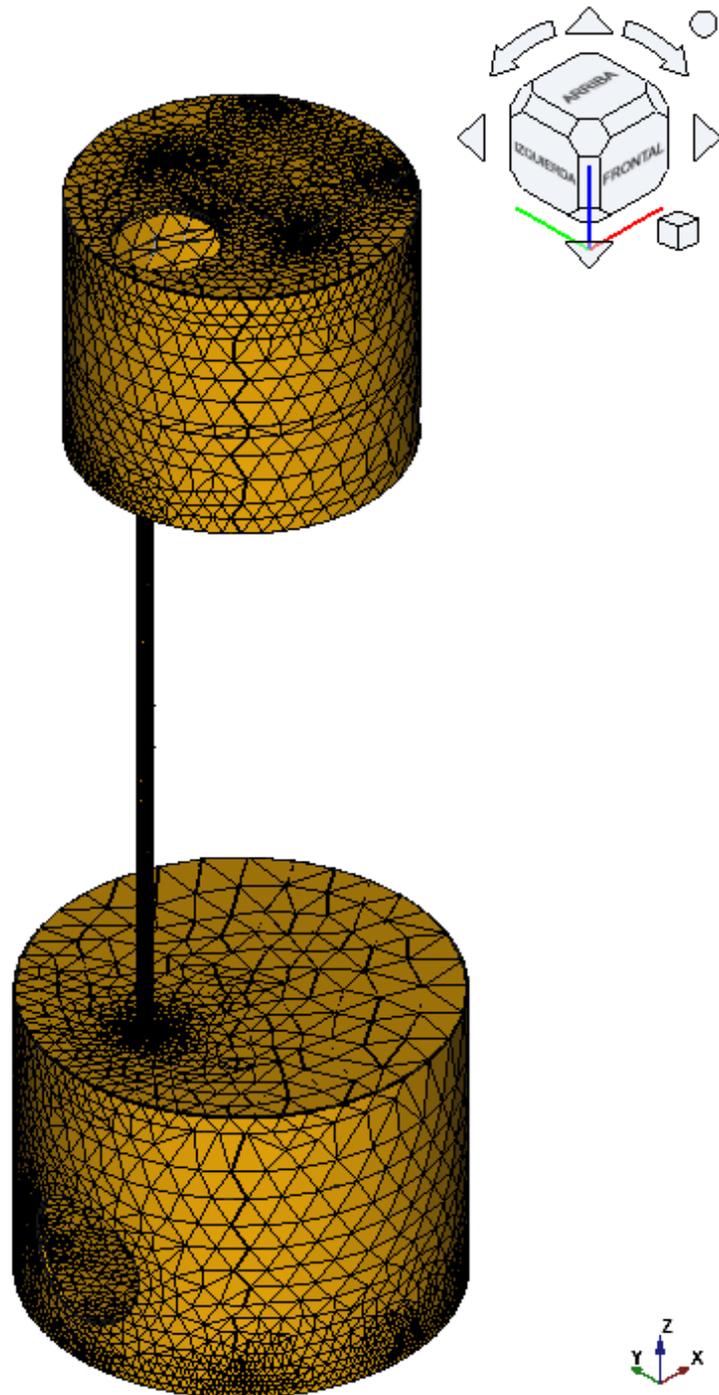
Este método divide la geometría de un elemento en partes más pequeñas llamadas "elementos finitos", que se conectan entre sí mediante puntos llamados "nodos". Estos elementos y nodos forman una estructura conocida como "malla". En la figura 3.6 se puede observar un ejemplo de cómo funciona este sistema.

El *MEF* reemplaza un número infinito de variables desconocidas por un conjunto manejable de elementos con coordenadas definidas (fig. 3.10). Estos elementos pueden ser de diferentes formas, como triángulos o tetraedros, dependiendo de la naturaleza y el tamaño del problema [5].

La precisión del *MEF* depende de la cantidad y tamaño de los elementos y nodos utilizados. En general, cuanto más pequeños y numerosos sean estos elementos, más precisos serán los resultados del análisis. En *FreeCAD*, el mallado presenta dos variables:

- Tipos de elementos: de primer o segundo orden.
- Precisión de la malla: muy burda, grueso, moderar, fino, muy fina o definido por el usuario.

Según varias combinaciones de estas variables, se puede lograr resultados similares utilizando elementos de segundo orden con una malla menos densa que con elementos de primer orden más precisos.



**Figura 3.6:** Malla generada por *Netgen* de primer orden de precisión muy fina.  
Fuente: Elaboración propia

Propiedad	valor	unid.
Densidad	7.800	$kg/m^3$
Coefficiente de Poisson	0,29	
Módulo de cizalladura	73	$GPa$
Resistencia a la cizalladura	300	$MPa$
Tensión de rotura	470	$MPa$
Resistencia a la tracción	260	$MPa$
Módulo elástico de Young	190	$GPa$

**Tabla 3.3:** Propiedades mecánicas del material seleccionado para el análisis.

Fuente: [4]

### 3.3.1 Parámetros de la malla

Debido a limitaciones de recursos como la RAM y la tarjeta gráfica, se redujo la dimensión del elemento analizado y se utilizaron ecuaciones de primer orden. Los detalles técnicos del sistema utilizado incluyen un procesador Intel Core i5-12500H de 12<sup>a</sup> generación, 16 GB de RAM (15,7 GB utilizables) y una tarjeta gráfica Nvidia GeForce RTX 4060 laptop GPU.

La zona de interés para este análisis es la zona del quemador, que se muestra en la figura 3.7. Esta zona se subdividió previamente para aplicar restricciones de temperatura de manera precisa, como se detalla en la sección 3.5.2.

La precisión del mallado se configuró "muy fina" para poder hacer el análisis sin errores como los mostrados en la figura 3.8. Las ecuaciones debían ser de primer orden debido al error mostrado en la figura 3.9, el cual fue causado por limitaciones de RAM. La carga final del archivo generada para mostrar los resultados era demasiado elevada, lo que provocó dicho error.

Por eso, finalmente, en cuanto a lo que respecta al mallado del análisis se utilizó una malla de primer orden de precisión muy fina, lo cual se refleja en los resultados detallados en la figura 3.10 y demostrado en la figura 3.6.

## 3.4 Material: acero P265GH

La selección del acero P265GH para el análisis de la caldera de recuperación surge de la necesidad de encontrar un material adecuado ante la falta de información detallada sobre la composición del material utilizado en la caldera de referencia. Este acero se emplea comúnmente en la fabricación de tubos de caldera [10].

Su capacidad para resistir altas temperaturas y soportar presiones significativas lo convierte en una elección ideal para entornos industriales exigentes como el caso en el que nos encontramos. Además, cumple con normativas rigurosas como la EN 10216-2, lo que garantiza su calidad y seguridad en aplicaciones críticas [10].

Por otro lado, el acero P265GH presenta un excelente comportamiento en procesos de soldadura, plegado, transformación y mecanización. Esta versatilidad no solo facilita la fabricación y mantenimiento de la caldera, sino que también contribuye a reducir los costos asociados con operaciones de reparación y modificación [4].

### 3.4.1 Propiedades del material

Las propiedades de interés del material seleccionado se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Este material no se encontraba inicialmente entre los predeterminados por el programa *FreeCAD* y fue necesario añadirlo manualmente. La figura 3.11 muestra los parámetros que fueron configurados en la carta de material en el entorno de trabajo *FEM*.

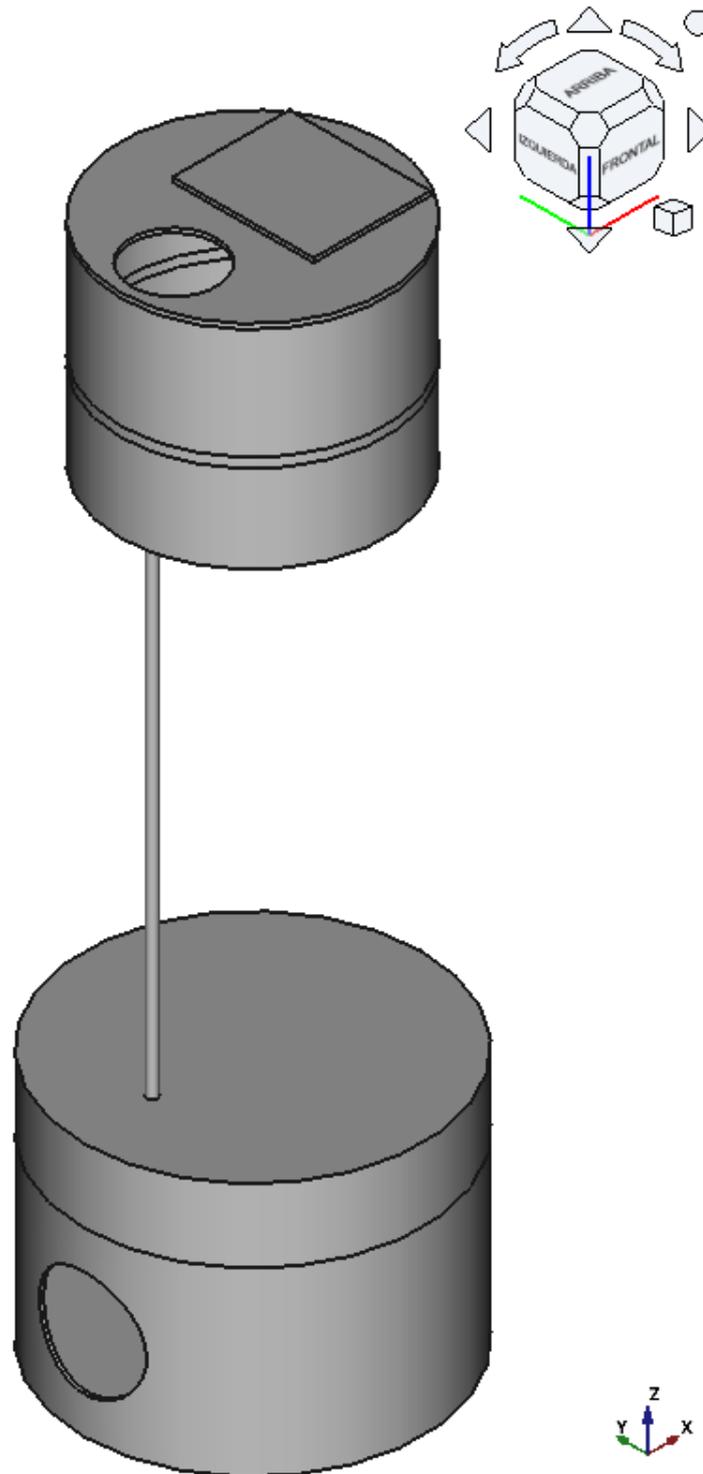


Figura 3.7: Zona del quemador con uno de sus tubos modelado.

Fuente: Elaboración propia

```
Vista de informe
11:24:19 ERROR()
11:24:19
11:24:19 CalculiX read results...
11:24:19 Read ccx results from frd file: C:/Users/Carmen/Documents/Trabajo final de grado/Análisis 1/SolverCcxTools\FEMMeshNetgen.frd
11:24:19 Nodes, but no results found in frd file. It means there only is a mesh but no results in frd file. Usually this happens for:
- analysis type 'NOANALYSIS'
- if CalculiX returned no results (happens on nonpositive jacobian determinant in at least one element)
- just no frd results where requested in input file (neither 'node file' nor 'el file' in output section')
11:24:19 Read ccx results from dat file: C:/Users/Carmen/Documents/Trabajo final de grado/Análisis 1/SolverCcxTools\FEMMeshNetgen.dat
```

Figura 3.8: Informe de error debido a precisión insuficiente.

Fuente: Elaboración propia

```

Vista de informe
23:44:04 Error ( ) Fg3iuec.uicore.uiprocess.ProcessError.Crasheo
23:44:04 CalculiX done without error!
23:44:04
23:44:04 CalculiX read results...
23:44:04 Read ccx results from frd file: C:/Users/Carmen/Documents/Trabajo final de grado/AnBlisis 1\SolverCcxTools\FEMMeshNetgen.frd
23:44:04 FEM: No nodes found in Frd file.
23:44:04 Problem on frd file import. No nodes found in frd file.
23:44:04 FEM: No result object in active Analysis.
23:44:04 Read ccx results from dat file: C:/Users/Carmen/Documents/Trabajo final de grado/AnBlisis 1\SolverCcxTools\FEMMeshNetgen.dat

```

**Figura 3.9:** Informe de error debido a limitaciones de RAM.

Fuente: Elaboración propia



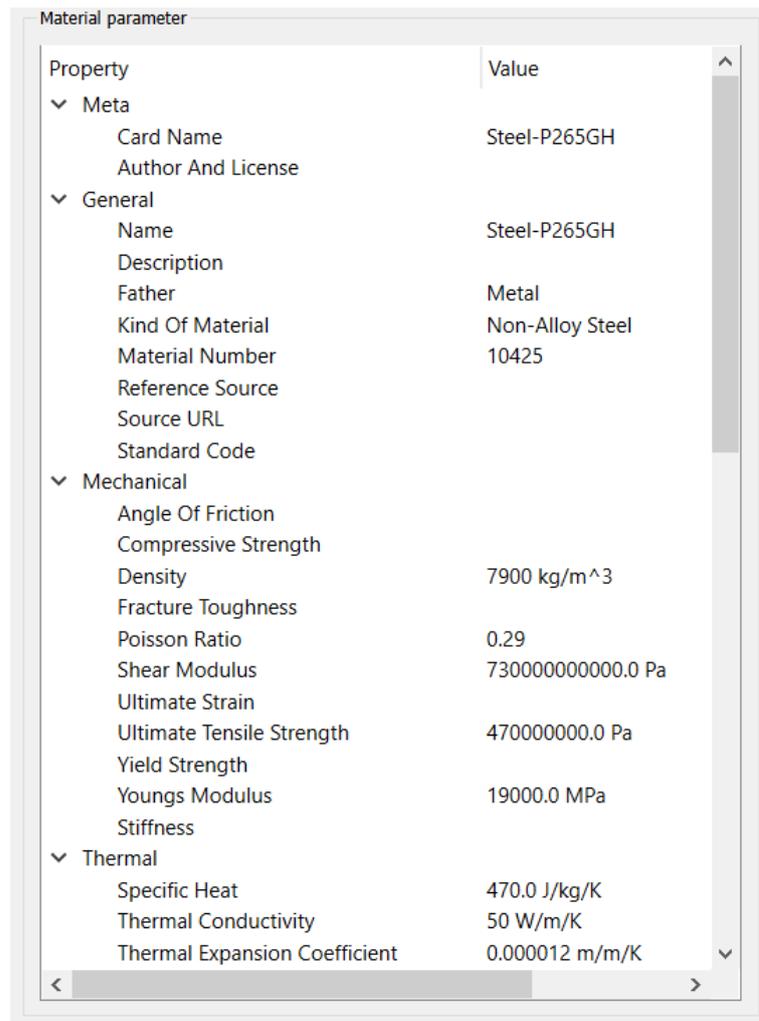
**Figura 3.10:** Elementos y parámetros de la malla del análisis por Netgen.

Fuente: Elaboración propia

Propiedad	valor	unid.
Calor específico	470	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad térmica	50	$\frac{W}{m \cdot K}$
Coefficiente de dilatación térmica	12	$\frac{\mu m}{m \cdot K}$

**Tabla 3.4:** Propiedades térmicas del material seleccionado para el análisis.

Fuente: [4]

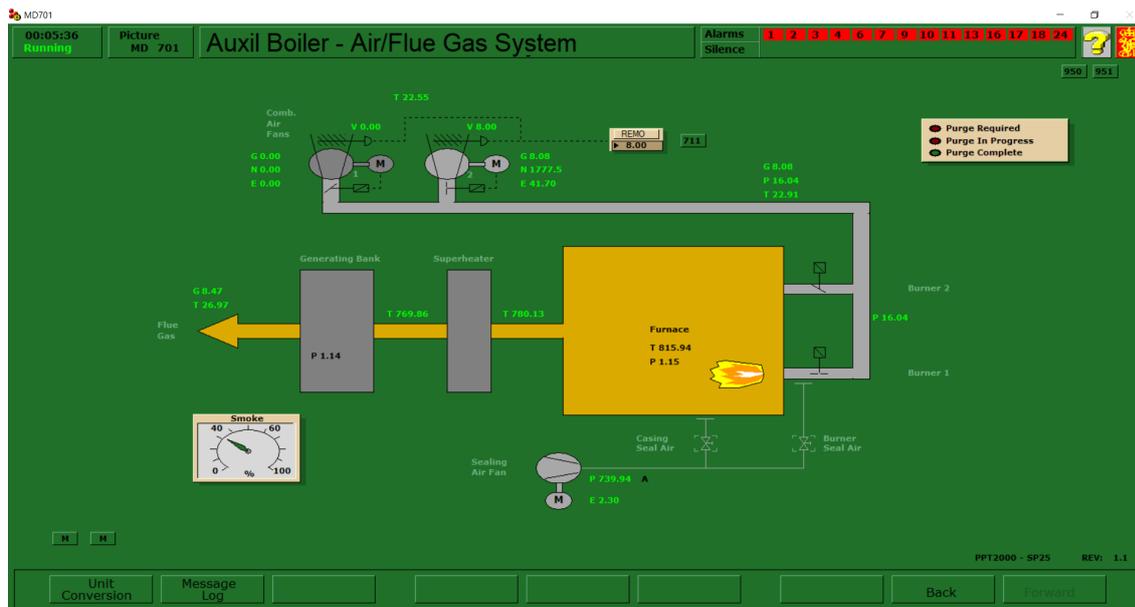


The image shows a 'Material parameter' dialog box with a table of properties. The table has two columns: 'Property' and 'Value'. The properties are grouped into categories: Meta, General, Mechanical, and Thermal. The values are: Card Name (Steel-P265GH), Author And License, Name (Steel-P265GH), Description, Father (Metal), Kind Of Material (Non-Alloy Steel), Material Number (10425), Reference Source, Source URL, Standard Code, Angle Of Friction, Compressive Strength, Density (7900 kg/m^3), Fracture Toughness, Poisson Ratio (0.29), Shear Modulus (730000000000.0 Pa), Ultimate Strain, Ultimate Tensile Strength (470000000.0 Pa), Yield Strength, Youngs Modulus (19000.0 MPa), Stiffness, Specific Heat (470.0 J/kg/K), Thermal Conductivity (50 W/m/K), and Thermal Expansion Coefficient (0.000012 m/m/K).

Property	Value
▼ Meta	
Card Name	Steel-P265GH
Author And License	
▼ General	
Name	Steel-P265GH
Description	
Father	Metal
Kind Of Material	Non-Alloy Steel
Material Number	10425
Reference Source	
Source URL	
Standard Code	
▼ Mechanical	
Angle Of Friction	
Compressive Strength	
Density	7900 kg/m^3
Fracture Toughness	
Poisson Ratio	0.29
Shear Modulus	730000000000.0 Pa
Ultimate Strain	
Ultimate Tensile Strength	470000000.0 Pa
Yield Strength	
Youngs Modulus	19000.0 MPa
Stiffness	
▼ Thermal	
Specific Heat	470.0 J/kg/K
Thermal Conductivity	50 W/m/K
Thermal Expansion Coefficient	0.000012 m/m/K

**Figura 3.11:** Parámetros establecidos en la carta del material en el entorno de trabajo *FEM*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.12:** Simulador ERS SP25, pantalla del sistema de gas de la caldera auxiliar. Encendido desde el escenario Cold Ship.

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Restricciones del análisis

Se han considerado dos escenarios principales para el análisis de la caldera de recuperación:

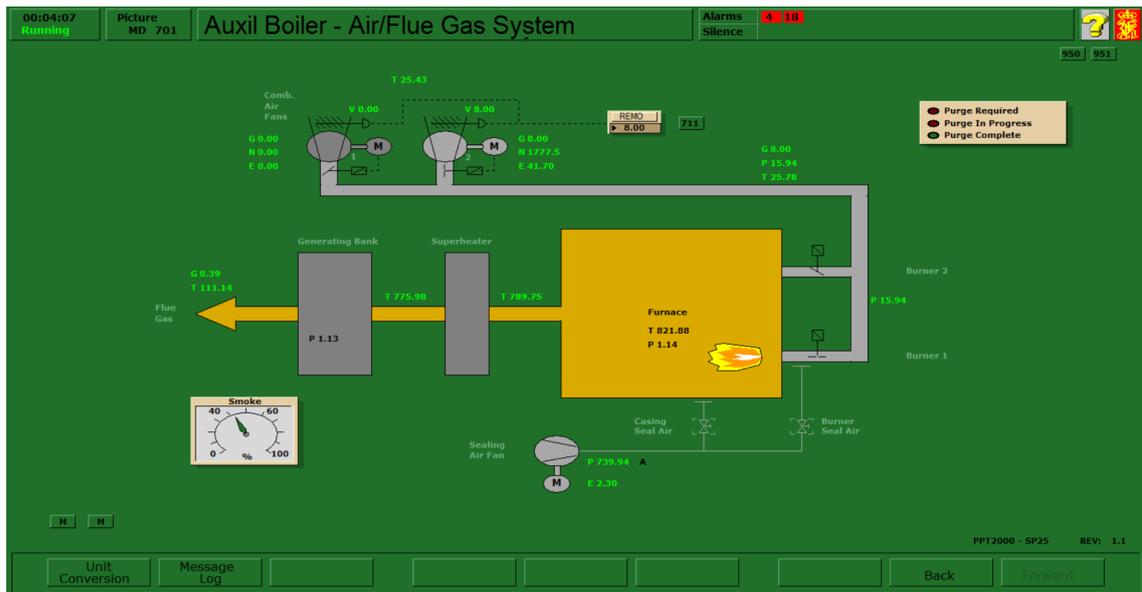
- *Escenario 1:* Caldera a temperatura ambiente y arrancado del quemador. Otros valores de interés son:
  - Presión de vapor saturado: 1 bar (presión atmosférica).
  - Temperatura de vapor saturado: 300 K (temperatura ambiente).
  - Temperatura del hogar: 1089,09 K, obtenida del simulador de una planta de vapor ERS SP25 (fig. 3.12).
  - Temperatura de la sección de salida de gases del quemador: 310 K.
- *Escenario 2:* Caldera a temperatura de servicio sin flujo de gases de escape y arrancado del quemador. Otros valores de interés son:
  - Presión de vapor saturado: 7 bar (presión de servicio con los motores principales encendidos).
  - Temperatura de vapor saturado: 438,10 K, según tabla de vapor saturado.
  - Temperatura del hogar: 1095,03 K, basada en datos del simulador ERS SP25 (fig. 3.13).
  - Temperatura de salida de gases de la sección del quemador: 450 K.

Las temperaturas de salida de los gases de la sección del quemador se asumen de esta manera debido a la falta de datos concretos disponibles. Además, durante el análisis realizado con el simulador ERS SP25, se observó que la temperatura de los gases de escape de la caldera auxiliar en ambos escenarios era ligeramente superior a la del vapor en ese instante.

#### 3.5.1 Restricciones de empotramiento

Estas restricciones se añaden con la intención de bloquear todos los grados de libertad de las caras, aristas o puntos seleccionados. En ambos análisis, por ser una restricción constructiva, son equivalentes.

Han sido limitadas tres zonas de forma general:



**Figura 3.13:** Simulador ERS SP25, pantalla del sistema de gas de la caldera auxiliar. Encendido desde el escenario Ready for Departure.

Fuente: Elaboración propia

1. La tapa superior: por la unión con la tapa exterior (fig. 3.14).
2. La tapa intermedia: por la plancha donde se une el haz de tubos de la parte de gases de escape (fig. 3.14).
3. Los soportes del hogar del quemador (fig. 3.15).

### 3.5.2 Restricciones de temperaturas

Hay diferentes tipos de restricciones de temperatura, pero en este estudio se han empleado concretamente dos: restricción de *temperatura inicial* (obligatoria para realizar un análisis termo-mecánico) y restricción de *temperatura*.

La restricción de temperatura, mencionada anteriormente, marca una temperatura fija e inmutable a una cara, arista o punto que se decida.

En ambos análisis, estas restricciones se aplicaron en las mismas dos zonas, variando su valor numérico:

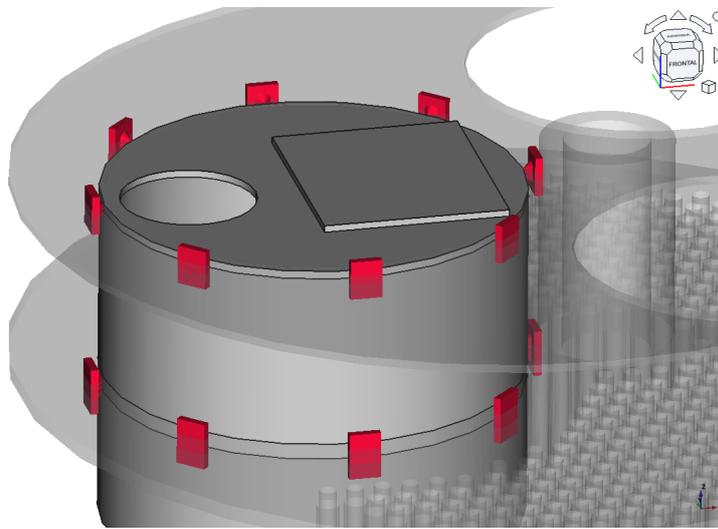
1. En la salida de los gases de escape del quemador (fig. 3.16).
2. En el hogar del quemador, en la zona de incidencia directa de la llama (fig. 3.17).

Para simular la transmisión de calor en la zona del quemador, se identificaron las áreas más calientes y más frías. Esto permitió al programa representar automáticamente la pérdida de temperatura progresiva (fig. 4.4).

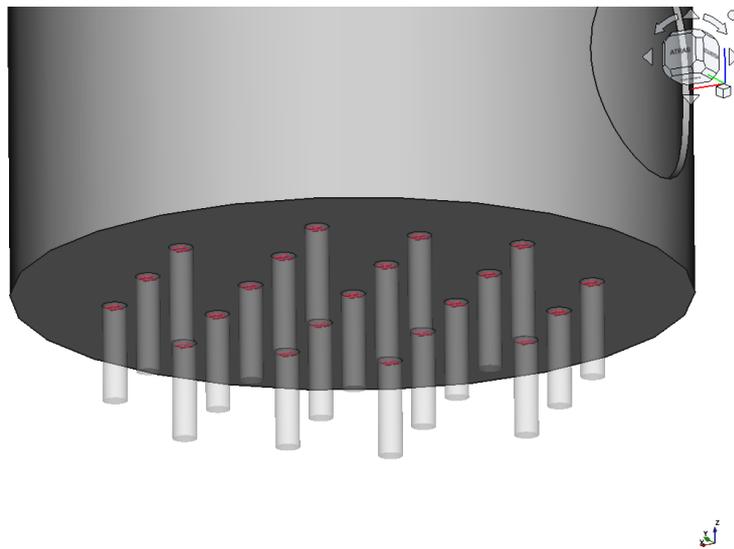
### 3.5.3 Restricciones de presión

Estas restricciones fijan un valor constante de presión en una cara específica, no siendo posible aplicarlas en aristas o puntos, como es lógico.

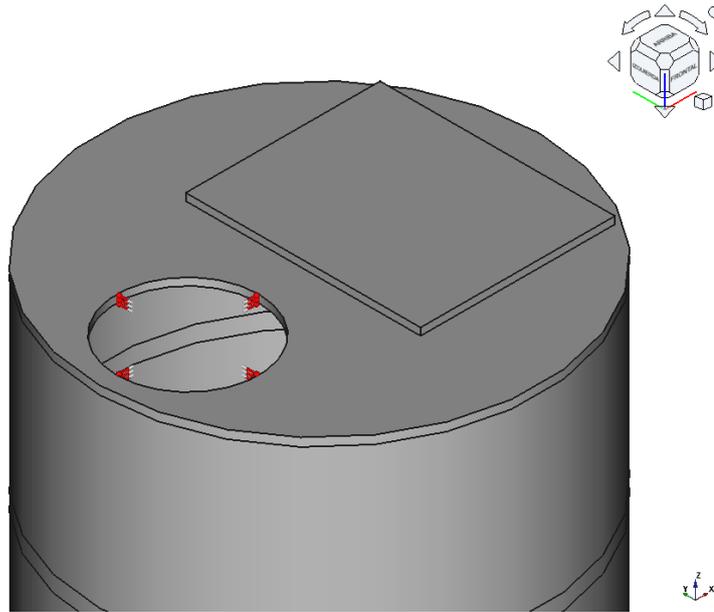
En ambos análisis, se aplicaron restricciones de presión en las caras que están en contacto con la parte presurizada de la caldera, es decir, donde se encuentra el vapor saturado.



**Figura 3.14:** Restricciones fijas de la parte superior de la zona del quemador.  
Fuente: Elaboración propia

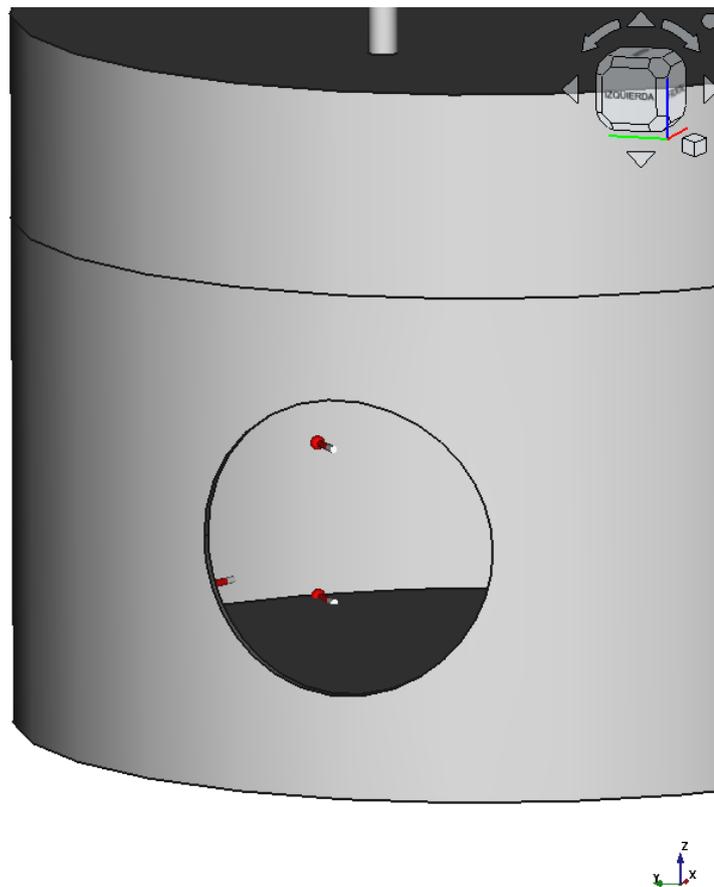


**Figura 3.15:** Restricciones fijas de la parte inferior de la zona del quemador.  
Fuente: Elaboración propia



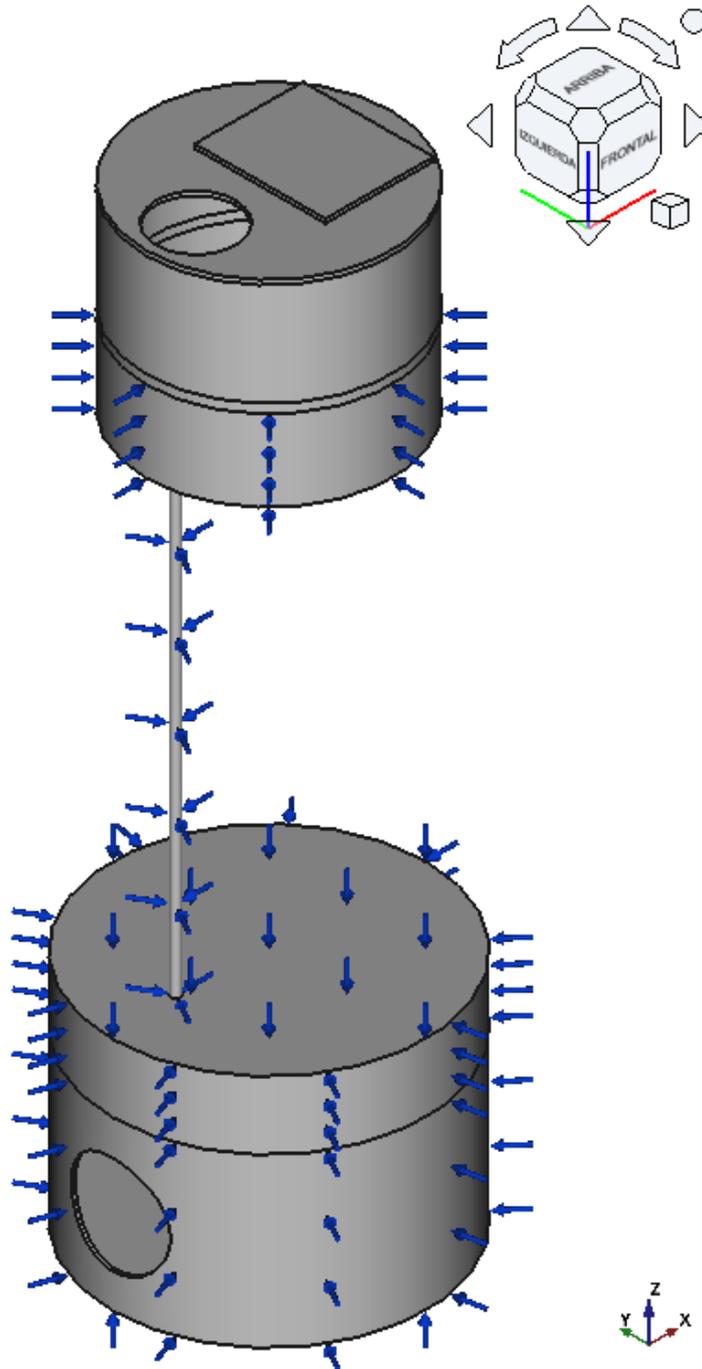
**Figura 3.16:** Restricción de temperatura en la salida de los gases de escape del quemador.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.17:** Restricción de temperatura en el hogar del quemador.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.18:** Restricción de presión en la zona de vapor.  
Fuente: Elaboración propia

# 4 Resultados

Los resultados obtenidos del análisis termo-mecánico de la caldera se incluyen a continuación, destacando la estructura en 3D del conjunto de la caldera, los desplazamientos, temperaturas y esfuerzos generados durante dos condiciones operativas distintas.

A todas las figuras generales de los resultados gráficos de las secciones 4.2 y 4.3 se les ha aplicado un filtro de corte con forma de caja, para poder observar con mejor detalle el interior de las piezas.

## 4.1 Modelo en 3D

En la figura 4.1 se muestra la vista isométrica de la caldera, la cual proporciona una visión general del objeto sin revelar los detalles internos. Para visualizar la estructura interna con mayor claridad, se ha aplicado una reducción de transparencia al 50% que se puede observar en la figura 4.2.

Se representaron los elementos más esenciales, mostrando la entrada y salida de todos los fluidos que participan en todo el proceso llevado por la caldera: entrada (fig. A.1) y salida (fig. A.2) de los gases de los motores principales, entrada (fig. A.5) y salida (fig. A.6) del agua de la caldera y salida (fig. A.6) de los gases del quemador.

En el anexo A se presentan más puntos de vista de la caldera, y en el anexo B se encuentran los planos acotados de forma general.

## 4.2 Análisis termo-mecánico del *Escenario 1*

Análisis del momento de encendido del quemador con todos los elementos a temperatura ambiente, es decir, con la caldera en frío.

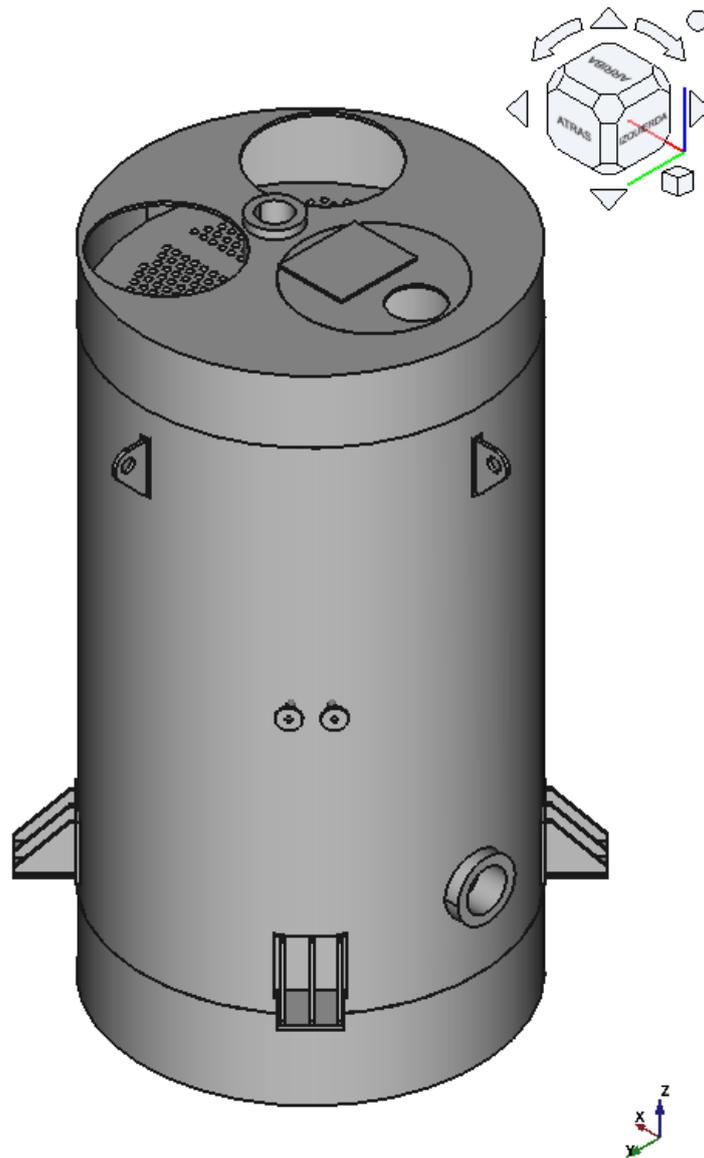
### 4.2.1 Magnitud del desplazamiento

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de la magnitud del desplazamiento del *Escenario 1*.

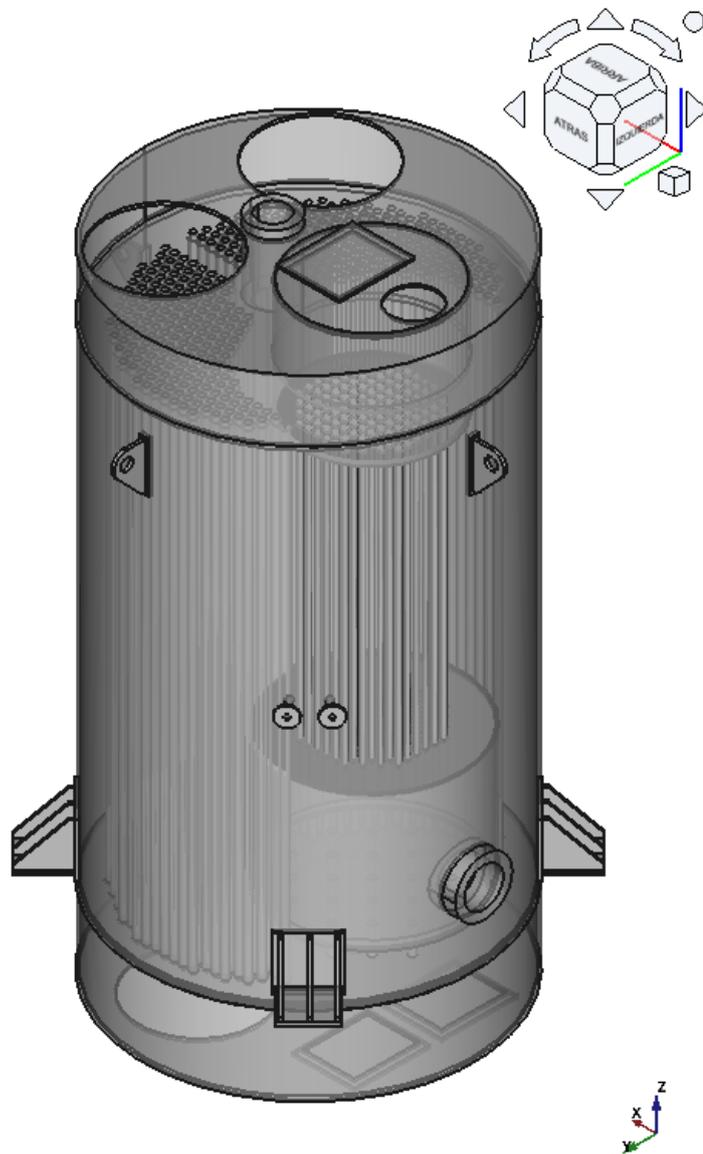
Magnitud de desplazamiento	
Min	0,00 mm
Máx	8,21 mm

**Tabla 4.1:** Datos del resultado de la magnitud del desplazamiento del *Escenario 1*.

En la figura 4.3 se observa cómo la principal zona afectada por el desplazamiento es la del hogar, con excepción de la base donde están los soportes y, con ello, las restricciones fijas.

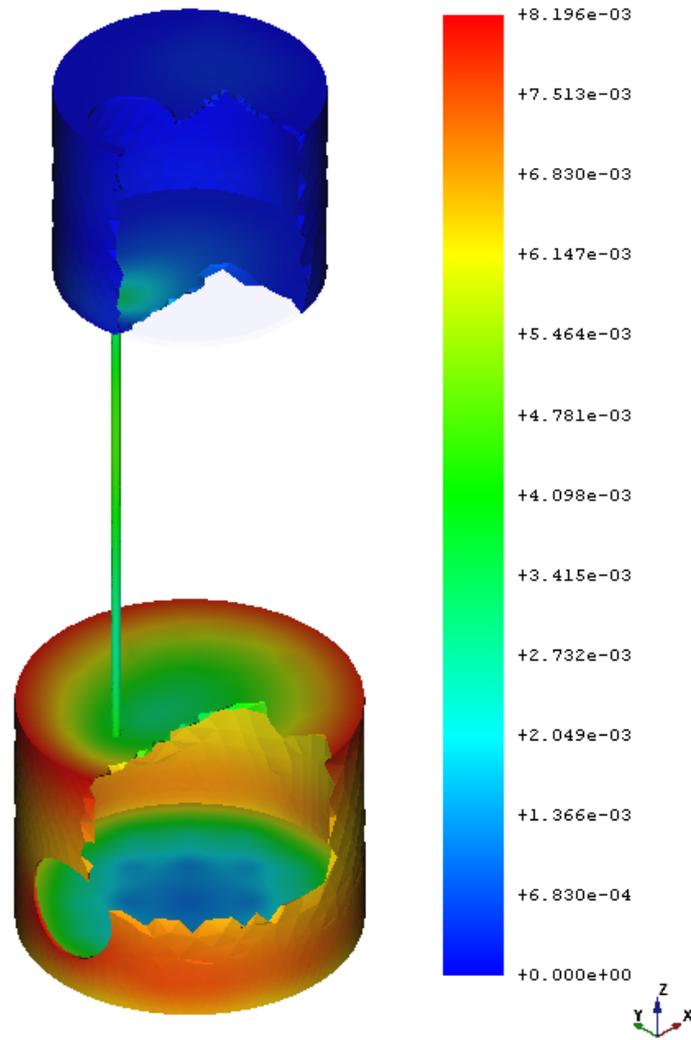


**Figura 4.1:** Vista isométrica del sólido completo de la caldera.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.2:** Vista isométrica del sólido completo de la caldera con un 50% de transparencia.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.3:** Resultado gráfico de la magnitud del desplazamiento del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia

Temperatura	
Min	310,00 K
Max	1089,09 K

**Tabla 4.2:** Datos del resultado de la temperatura del *Escenario 1*.

## 4.2.2 Temperatura

En la tabla 4.2 se presentan los datos del resultado de la temperatura del *Escenario 1*. El resultado mínimo y máximo coincide con los valores que se designaron en las restricciones de temperatura para la zona más fría y la más caliente.

En la figura 4.4 se observa la distribución de temperaturas calculada por el solucionador.

## 4.2.3 Tensión de Von Mises

La tabla 4.3 muestra los datos del resultado de la tensión de Von Mises para el *Escenario 1*, donde observamos que la tensión máxima alcanza los 1816,76 MPa. Este valor es significativo porque supera ampliamente la resistencia a la tracción del material utilizado, que es de 260 MPa, como se mencionó en el punto 3.4.1.

Tensión de Von Mises	
Min	522,76 kPa
Max	1816,76 MPa

**Tabla 4.3:** Datos del resultado de la tensión de Von Mises del *Escenario 1*.

En la figura 4.5 se observa la distribución de las tensiones de Von Mises del *Escenario 1*.

En la figura 4.6 se observa gráficamente la distribución de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar. Es evidente que esta área es la más afectada, mostrando concentraciones elevadas de tensión. Esto podría llevar a deformaciones plásticas permanentes o incluso a fracturas si las condiciones se mantienen o empeoran.

## 4.2.4 Esfuerzo principal máximo

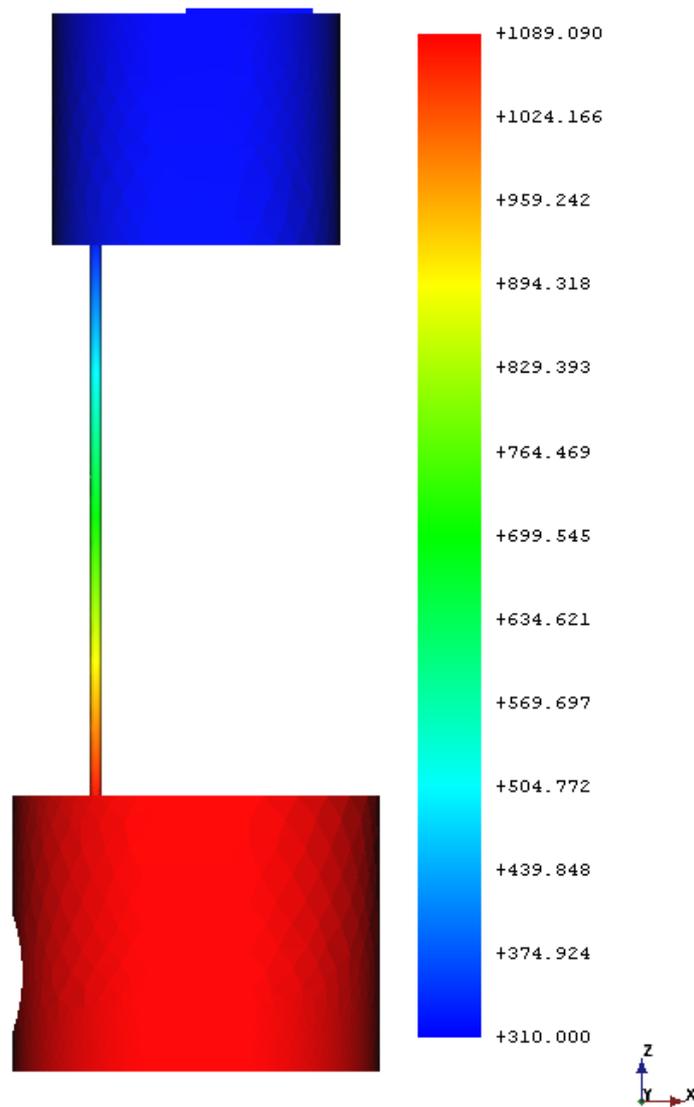
En la tabla 4.4 se presentan los datos del resultado del esfuerzo principal máximo del *Escenario 1*. Se observa como el valor máximo supera considerablemente el límite marcado por el material, 470 MPa (tensión de rotura indicada en la tabla 3.3). Esto indica que la estructura está operando bajo condiciones que podrían comprometer su resistencia y durabilidad a largo plazo.

Esfuerzo principal máximo	
Min	- 58,06 MPa
Max	1002,17 MPa

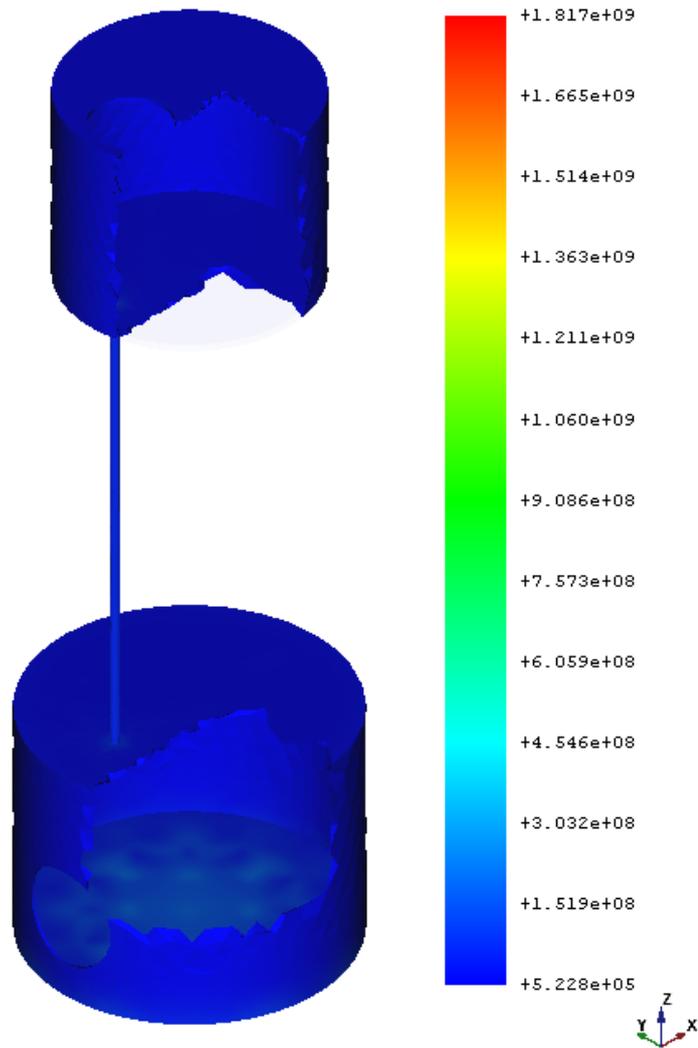
**Tabla 4.4:** Datos del resultado del esfuerzo principal máximo del *Escenario 1*.

En la figura 4.7 se observa la distribución de los esfuerzos principales máximos del *Escenario 1*.

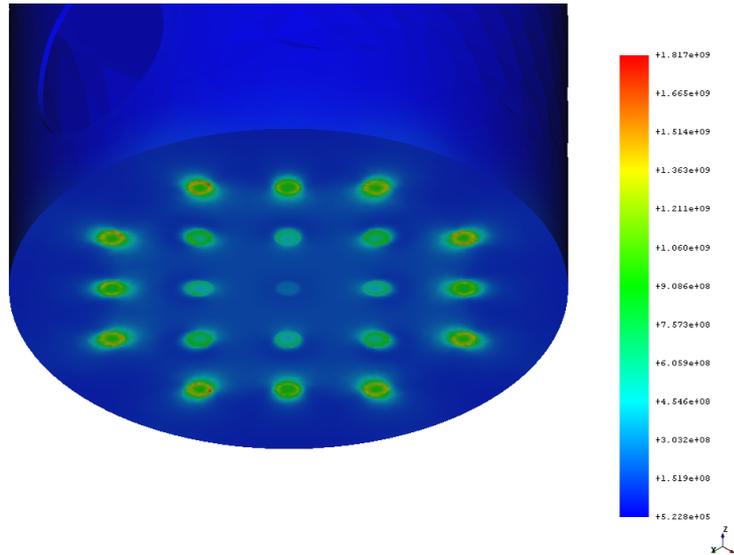
En la figura 4.8 se muestra gráficamente la distribución de estos esfuerzos principales máximos en la zona analizada. Es evidente que existen áreas donde los esfuerzos son significativamente altos, lo cual puede ser crítico para la integridad estructural.



**Figura 4.4:** Resultado gráfico de la temperatura del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.5:** Resultado gráfico de la tensión de Von Mises del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.6:** Resultado gráfico de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia

Esfuerzo principal mínimo	
Min	- 1410,97 MPa
Max	68,12 MPa

**Tabla 4.5:** Datos del resultado del esfuerzo principal mínimo del *Escenario 1*.

#### 4.2.5 Esfuerzo principal mínimo

En la tabla 4.5 se muestran los datos del resultado del esfuerzo principal mínimo del *Escenario 1*.

En la figura 4.9 se observa la distribución de los esfuerzos principales mínimos del *Escenario 1*.

#### 4.2.6 Esfuerzo cortante máximo

En la tabla 4.6 se presentan los datos del resultado del esfuerzo cortante máximo (Tresca) del *Escenario 1*.

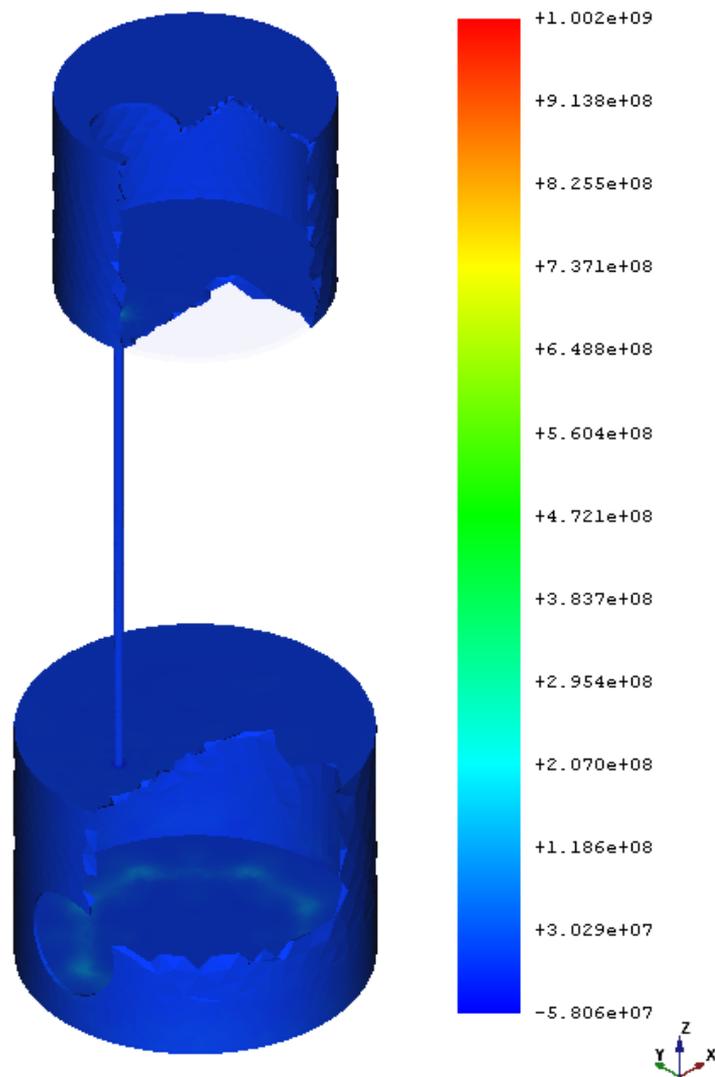
La resistencia a la cizalladura del material, como se mencionó en el punto 3.4.1, es de 300 MPa. Es evidente que los valores de esfuerzo cortante máximo obtenidos en este análisis superan este límite.

Esfuerzo cortante máximo (Tresca)	
Min	300,01 kPa
Max	1047,89 MPa

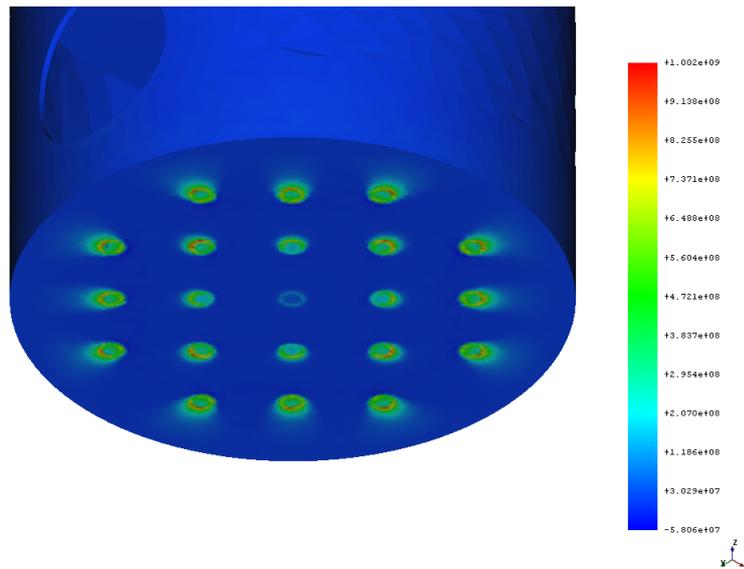
**Tabla 4.6:** Datos del resultado del esfuerzo cortante máximo del *Escenario 1*.

En la figura 4.10 se muestra la distribución de los esfuerzos cortantes máximos del *Escenario 1*.

En la figura 4.11 se muestra gráficamente la distribución de estos esfuerzos cortantes máximos en la zona de los soportes del hogar. Se observa claramente que existen áreas críticas donde los esfuerzos cortantes son muy elevados, especialmente en los puntos de unión con los soportes.



**Figura 4.7:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.8:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos de los soportes del hogar del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Análisis termo-mecánico del *Escenario 2*

Análisis del momento de encendido del quemador cuando los gases de escape de los motores principales dejan de transmitir calor a la caldera y se enciende el quemador.

#### 4.3.1 Magnitud del desplazamiento

En la tabla 4.7 se muestran los resultados de la magnitud del desplazamiento en el *Escenario 2*.

Magnitud de desplazamiento	
Min	0,00 mm
Max	8,27 mm

**Tabla 4.7:** Datos del resultado de la magnitud del desplazamiento del *Escenario 2*.

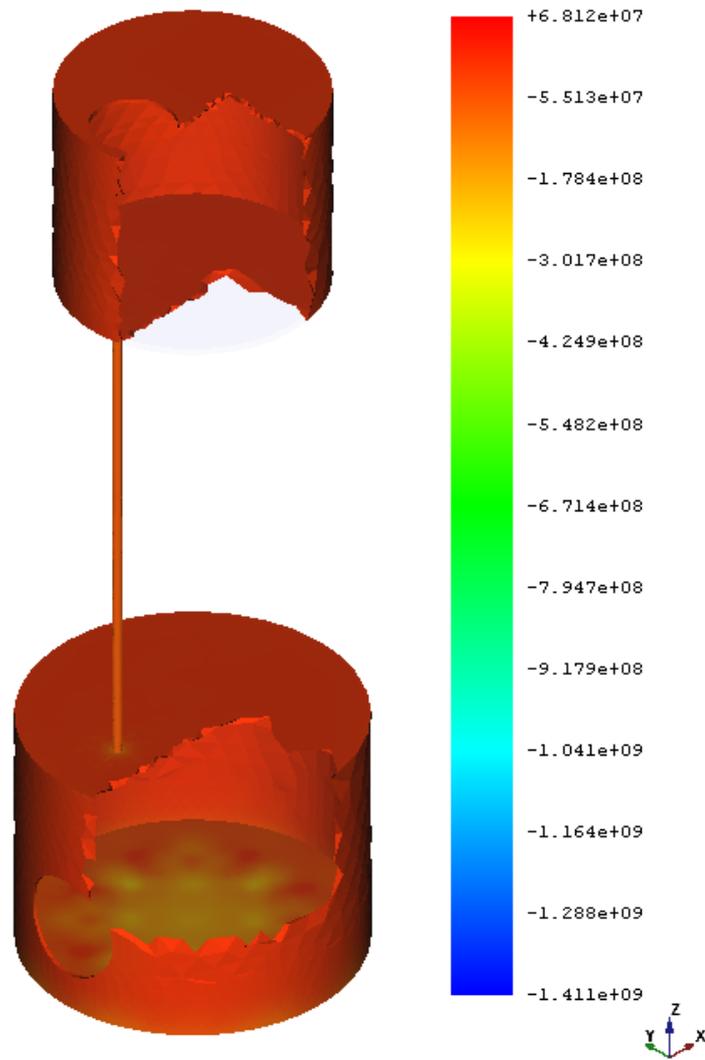
En la figura 4.12 se muestra la magnitud del desplazamiento del *Escenario 2*.

De forma numérica, en el *Escenario 2* se observa que el desplazamiento es ligeramente superior en comparación con el análisis anterior. Además, se ha notado una variación significativa en la distribución de este desplazamiento, concentrándose más ahora en la zona del tubo. Aunque continúa afectando al hogar de la caldera, también se extiende hacia la parte superior de la sección; esta más distribuido.

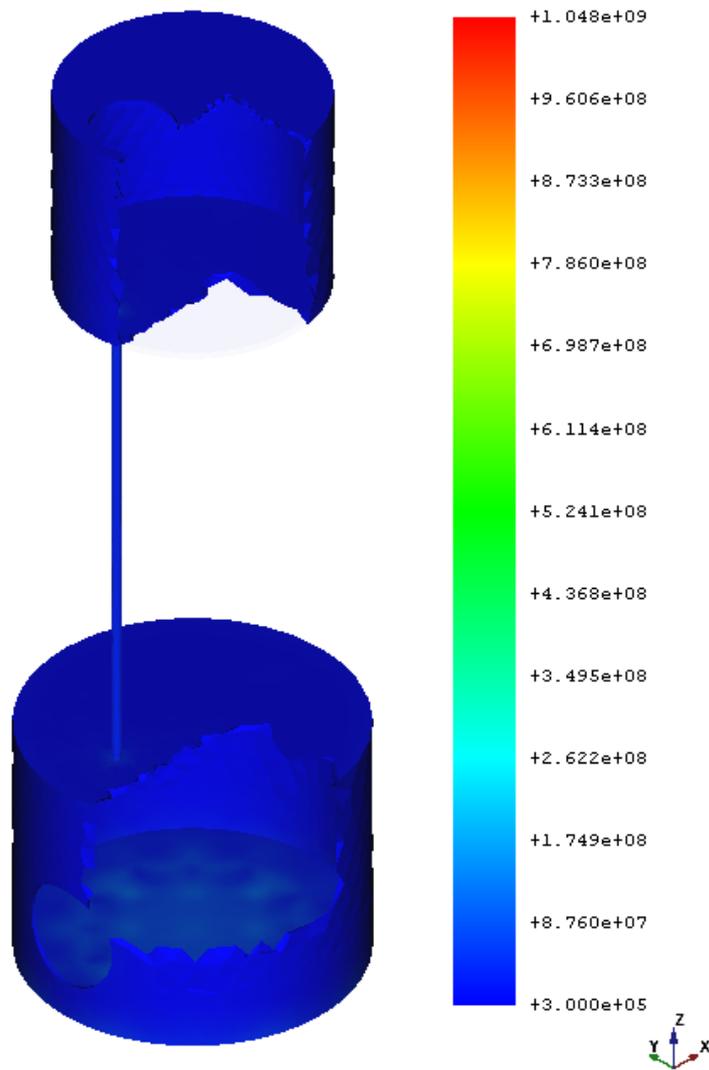
#### 4.3.2 Temperatura

En la tabla 4.8 se muestran los resultados de la temperatura del *Escenario 2*. El resultado mínimo y máximo coincide con los valores que se designaron en las restricciones de temperatura a la zona más fría y a la más caliente.

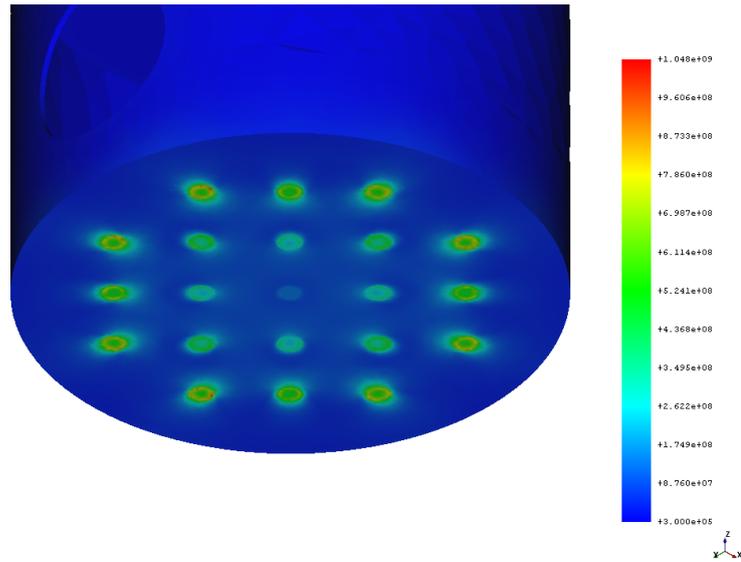
La figura 4.13 se observa la distribución de la temperatura calculada por el solucionador, como sucedió con el primer escenario.



**Figura 4.9:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia

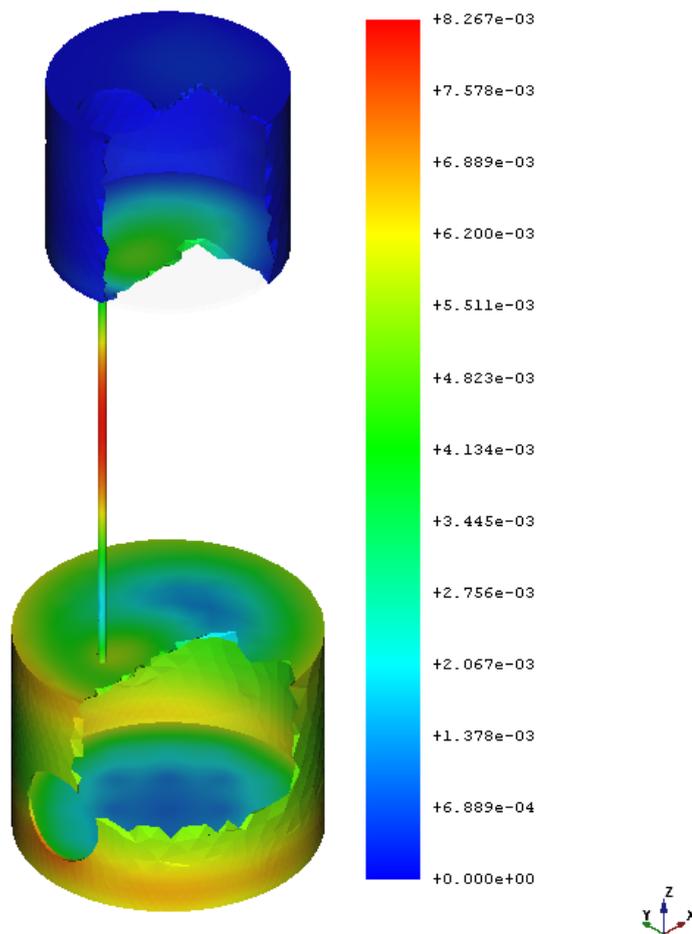


**Figura 4.10:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos del *Escenario 1*.  
Fuente: Elaboración propia



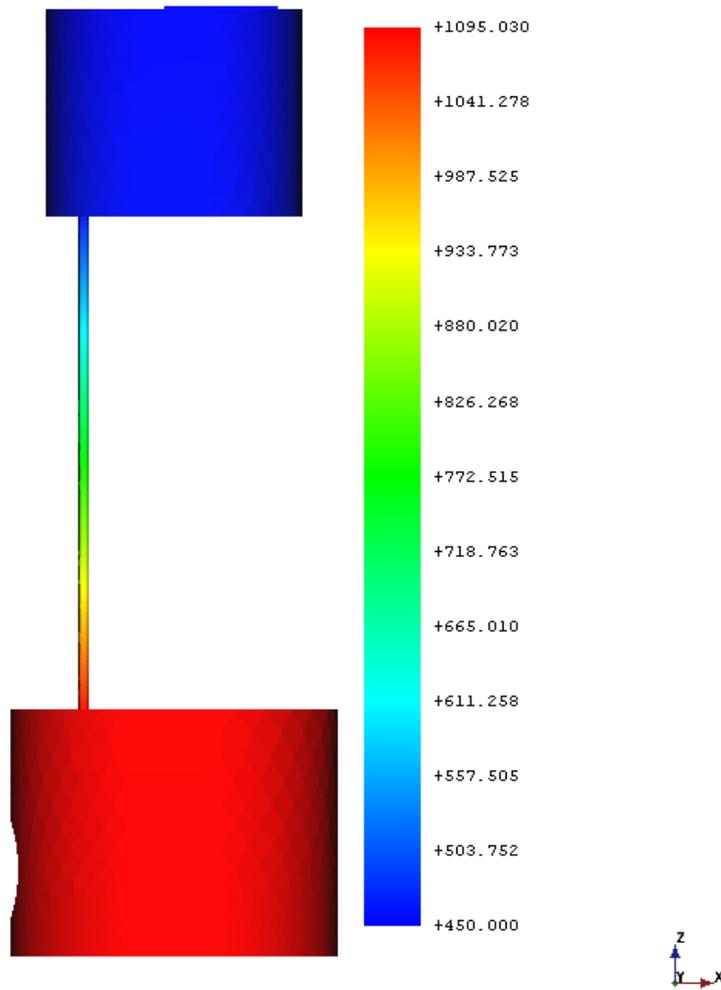
**Figura 4.11:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos de la base del hogar del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.12:** Resultado gráfico de la magnitud del desplazamiento del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.13:** Resultado gráfico de la temperatura del *Escenario 2*.  
Fuente: Elaboración propia

Temperatura	
Min	450,00 K
Max	1095,03 K

**Tabla 4.8:** Datos del resultado de la temperatura del *Escenario 2*.

### 4.3.3 Tensión de Von Mises

En la tabla 4.9 se muestran los resultados de la tensión de Von Mises obtenidos en el *Escenario 2*. La máxima tensión observada supera la resistencia a la tracción del material, que es de 260 MPa.

Tensión de Von Mises	
Min	991,00 kPa
Max	1474,55 MPa

**Tabla 4.9:** Datos del resultado de la tensión de Von Mises del *Escenario 2*.

En la figura 4.15 se muestra la distribución de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar del *Escenario 2*.

Este resultado nos hace ver que la estructura analizada está experimentando tensiones superiores a las especificaciones de resistencia del material, como se puede observar en la figura 4.15.

### 4.3.4 Esfuerzo principal máximo

Los resultados del esfuerzo principal máximo del *Escenario 2* se presentan en la tabla 4.10. Al igual que en el primer escenario, la tensión de rotura del material, que es de 470 MPa, nuevamente se ve superada.

Esfuerzo principal máximo	
Min	- 46,88 MPa
Max	864,08 MPa

**Tabla 4.10:** Datos del resultado del esfuerzo principal máximo del *Escenario 2*.

La figura 4.16 ilustra gráficamente la distribución de los esfuerzos principales máximos del *Escenario 2*.

Para poder observar el área crítica donde el material se ve superada su tensión de rotura hay que observar la figura 4.17. Los soportes del hogar siguen siendo los más afectados de la estructura.

### 4.3.5 Esfuerzo principal mínimo

Los resultados del esfuerzo cortante máximo (Tresca) del *Escenario 2* se detallan en la tabla 4.12.

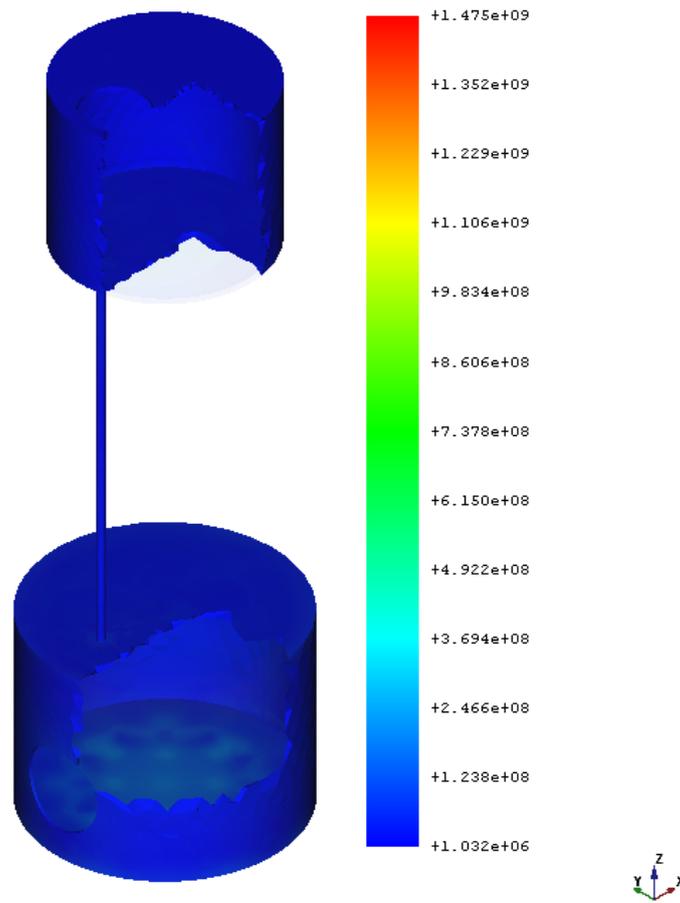
La figura 4.19 muestra la distribución gráfica de los esfuerzos cortantes máximos del *Escenario 2*.

### 4.3.6 Esfuerzo cortante máximo

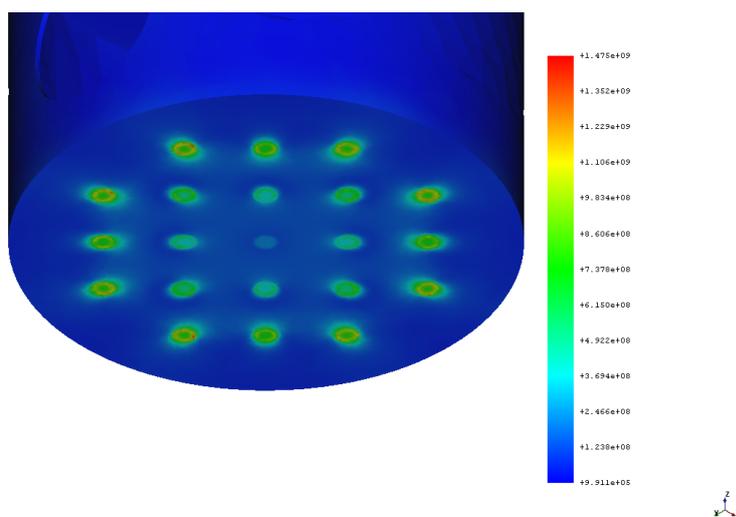
En la tabla 4.12 se presentan los datos del resultado del esfuerzo cortante máximo del *Escenario 2*. El esfuerzo cortante máximo supera la resistencia del material que vale 300 MPa.

En la figura 4.19 se muestra la distribución de los esfuerzos cortantes máximos observados en el *Escenario 2*, donde no se puede apreciar la magnitud y ubicación de estos esfuerzos sobre la estructura analizada, ya que el área crítica se encuentra en la base del hogar.

Los soportes del hogar son puntos críticos donde los esfuerzos cortantes máximos exceden la resistencia a la cizalladura del material, como se evidencia claramente en la figura 4.20.

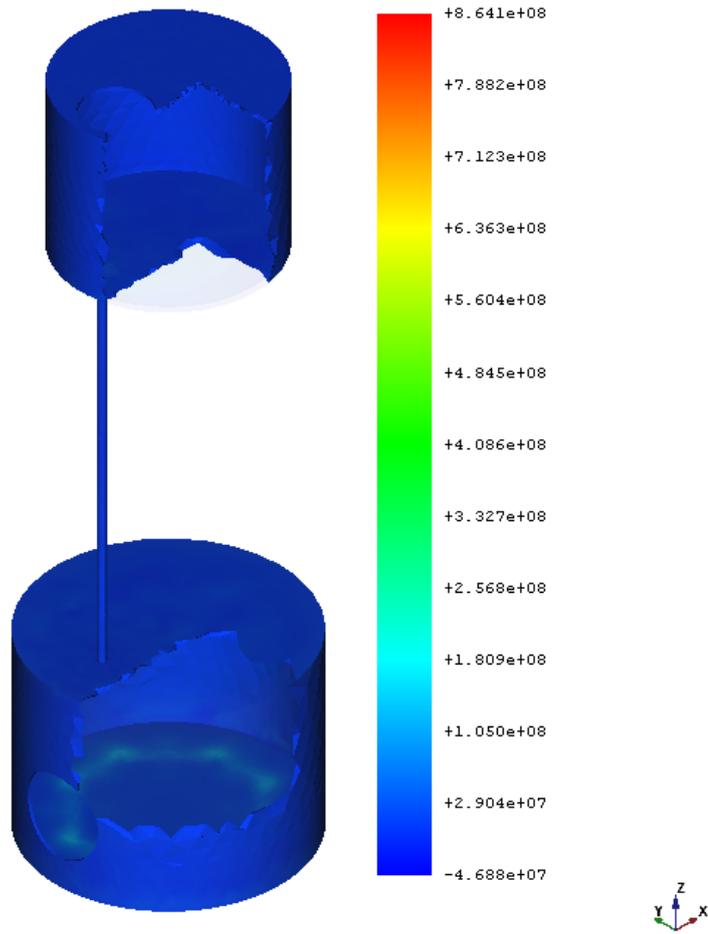


**Figura 4.14:** Resultado gráfico de la tensión de Von Mises del *Escenario 2*.  
Fuente: Elaboración propia



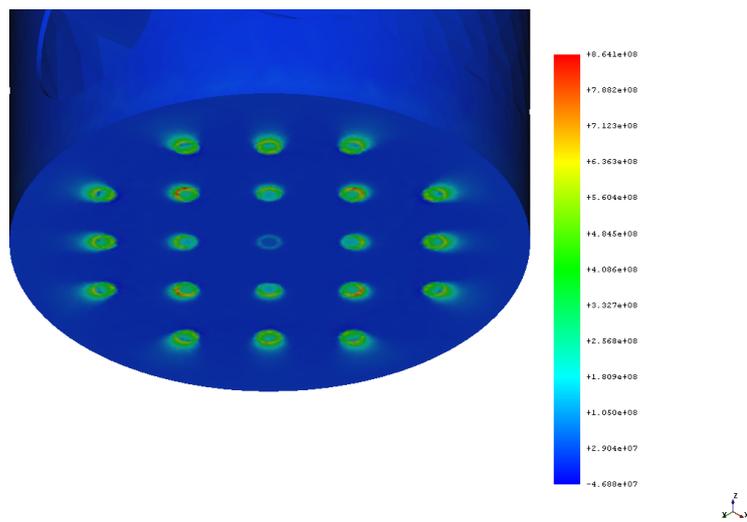
**Figura 4.15:** Resultado gráfico de la tensión de Von Mises en la zona de los soportes del hogar del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



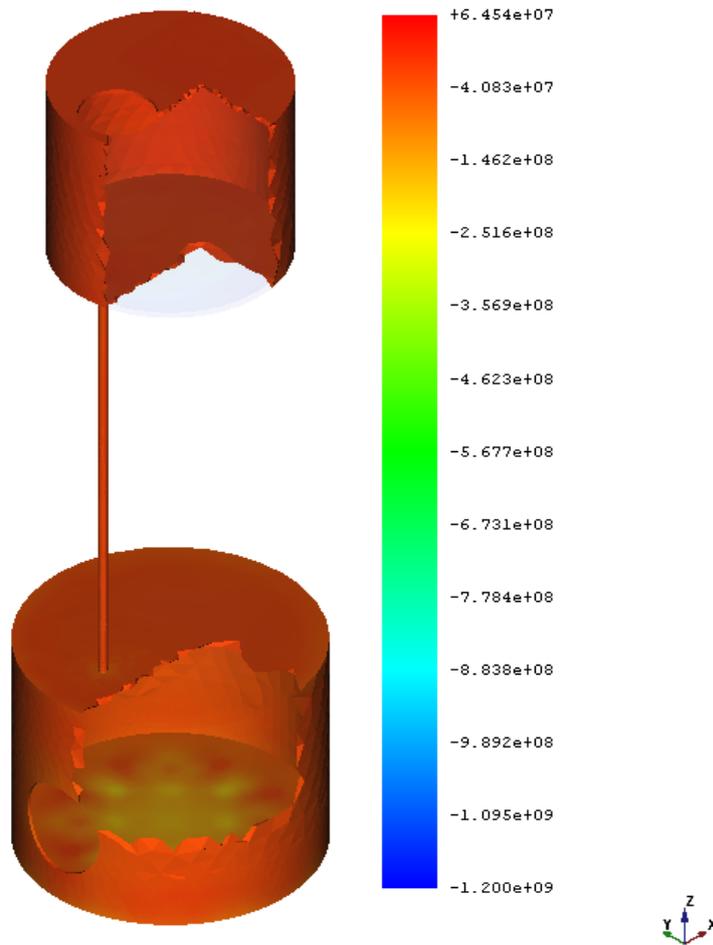
**Figura 4.16:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



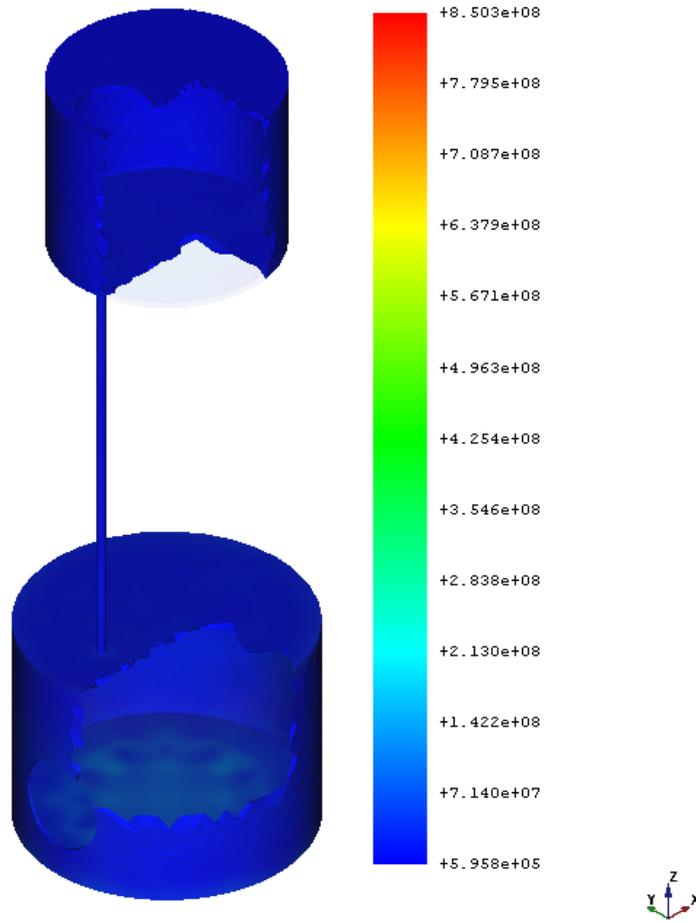
**Figura 4.17:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos en la base del hogar del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia

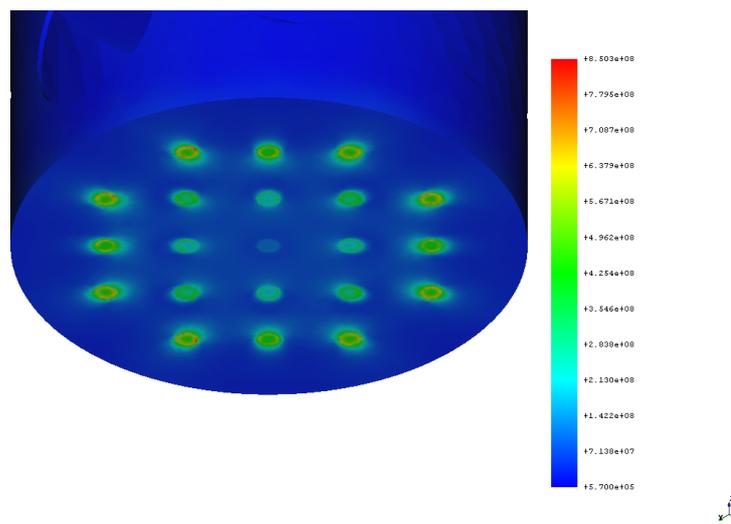


**Figura 4.18:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.19:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos del *Escenario 2*.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.20:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes máximos de la base del hogar del *Escenario 2*.  
Fuente: Elaboración propia

Esfuerzo principal mínimo	
Min	- 1199,92 MPa
Max	64,54 MPa

**Tabla 4.11:** Datos del resultado del esfuerzo principal mínimo del *Escenario 2*.

Esfuerzo cortante máximo (Tresca)	
Min	569,98 kPa
Max	850,30 MPa

**Tabla 4.12:** Datos del resultado del esfuerzo cortante máximo del *Escenario 2*.

## 4.4 Resumen de resultados del análisis de ambos escenarios

A modo de resumen y para permitir una comparación efectiva, se recoge en la tabla 4.13 los resultados obtenidos del análisis realizado en los dos escenarios planteados.

Magnitud	Valor		Unid.
	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	
Desplazamiento, máximo	8,21	8,27	mm
Desplazamiento, mínimo	0,00	0,00	mm
Temperatura, máximo	1089,09	1095,03	K
Temperatura, mínimo	310,00	450,00	K
Tensión de Von Mises, máximo	1816,76	1474,55	MPa
Tensión de Von Mises, mínimo	0,52	0,99	MPa
Esfuerzo principal máximo	1002,17	864,08	MPa
Esfuerzo principal mínimo	-1410,97	-1199,92	MPa
Esfuerzo cortante máximo (Tresca), máximo	1047,89	850,30	MPa
Esfuerzo cortante máximo (Tresca), mínimo	0,30	0,57	MPa

**Tabla 4.13:** Recopilación de todos los datos obtenidos en ambos escenarios.

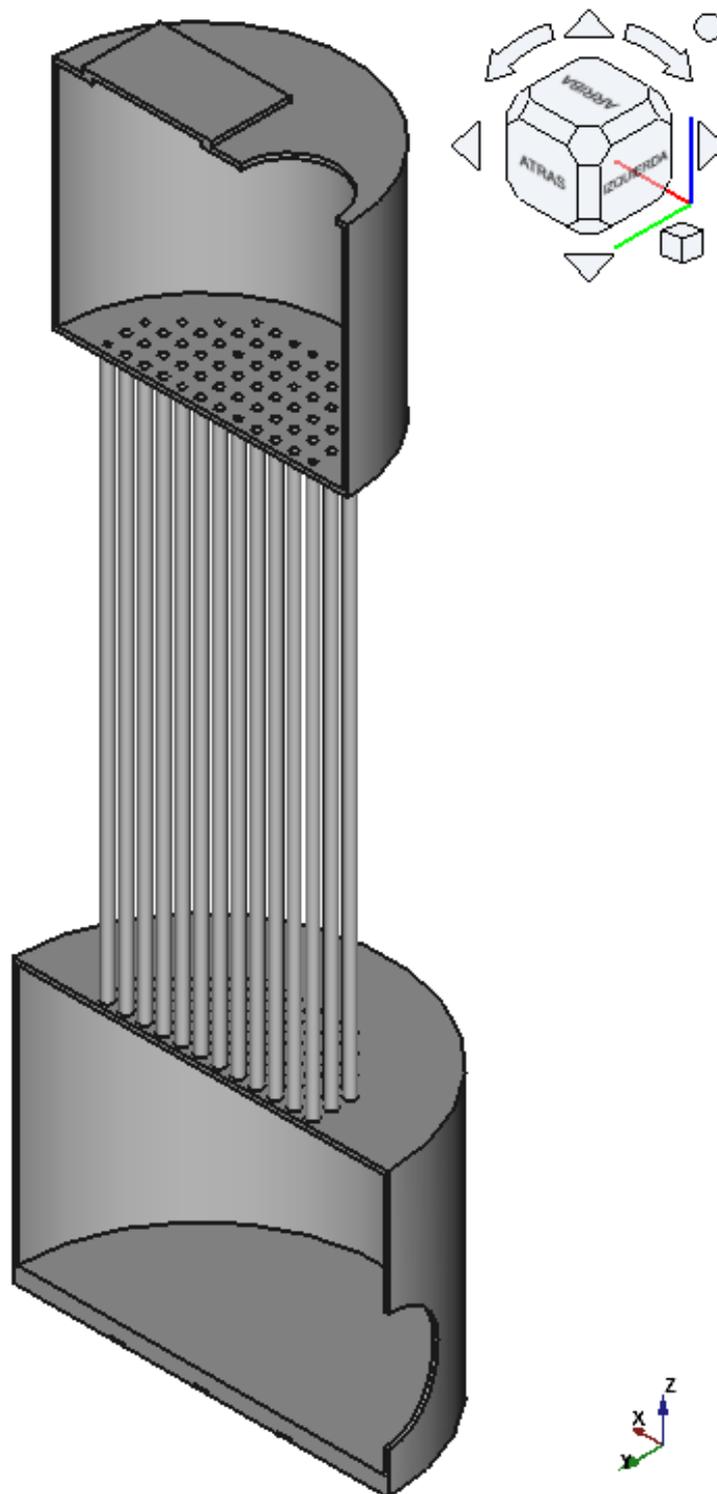
## 4.5 Resultados adicionales

Con una estación de trabajo más potente, se intentó realizar un análisis completo del banco de tubos de la zona del quemador, aplicando las mismas restricciones utilizadas en los escenarios anteriores. Sin embargo, debido a errores del programa, fue necesario realizar una operación booleana de corte con un cubo y dividir el quemador por la mitad (fig. 4.21). Además, no se pudieron considerar las restricciones provocadas por las estructuras exteriores debido a esta operación, pero para compensar el corte se añadió una restricción de desplazamiento del *eje y* en la cara cortada. Por lo tanto, este es un resultado irreal, pero se realizó para observar cómo reacciona la estructura con el conjunto de sus tubos.

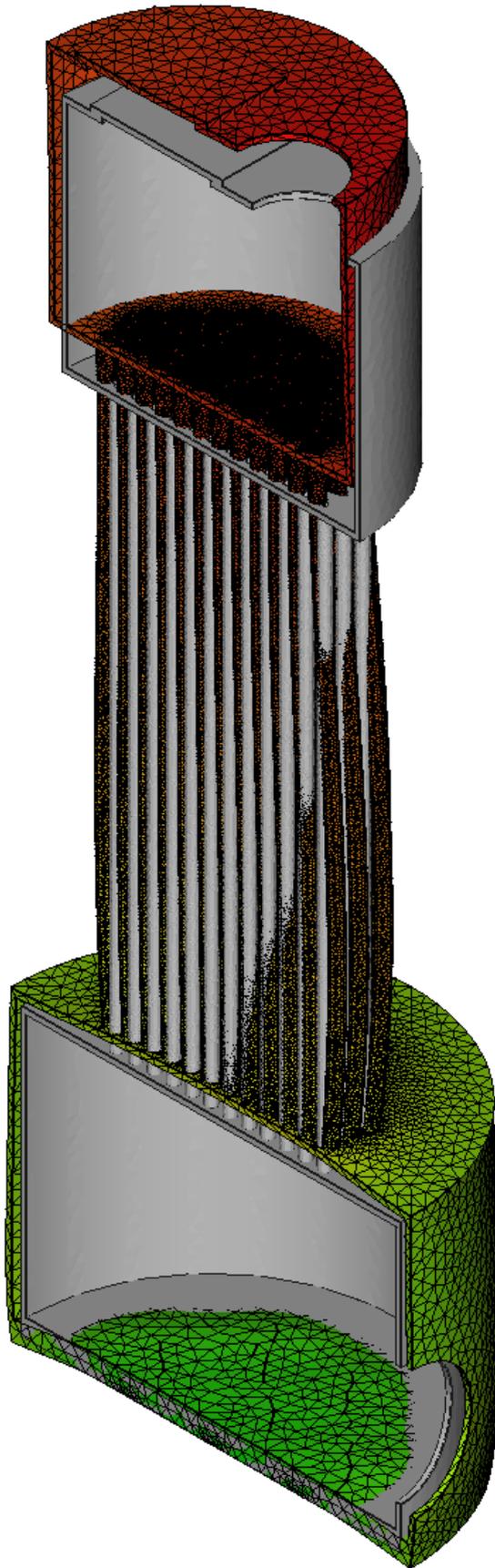
Este análisis únicamente se realizó con las restricciones de temperatura del *Escenario 1*.

En la figura 4.22 se muestra el desplazamiento sufrido por la sección del quemador ampliado por 10 para facilitar su observación. Esta pieza sufriría un desplazamiento máximo de 16,97 mm.

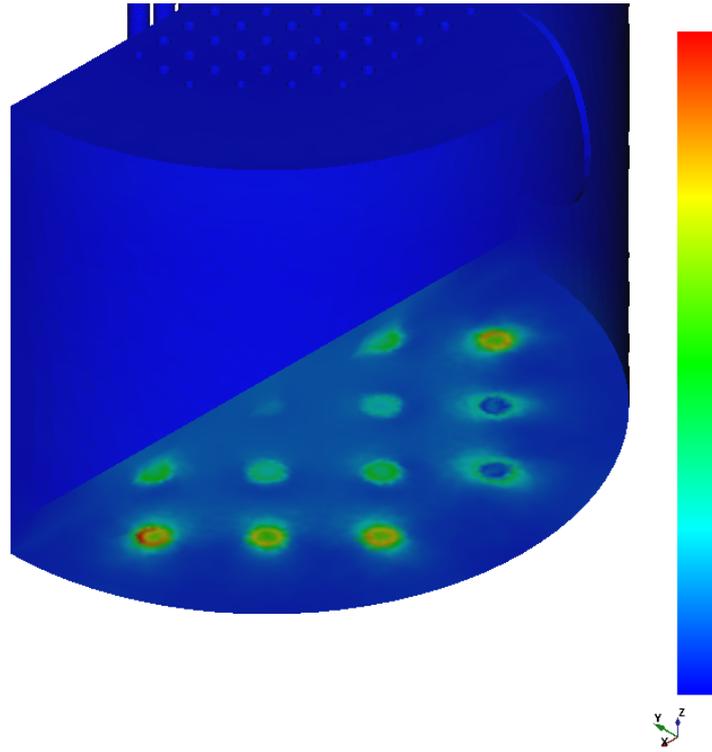
Los esfuerzos calculados, al igual que en los ambos escenarios analizados, presentan sus valores máximos en la base. En las figuras 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26.



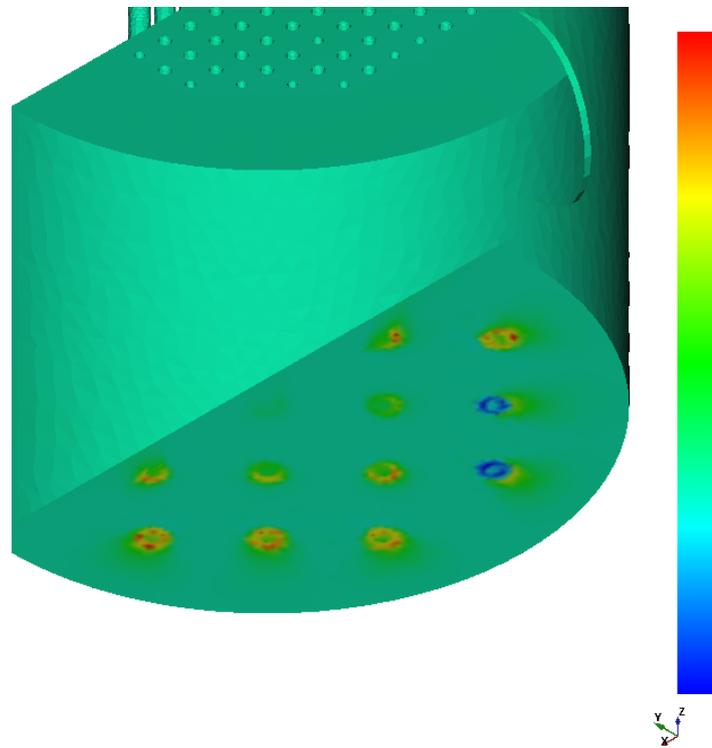
**Figura 4.21:** Zona del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia



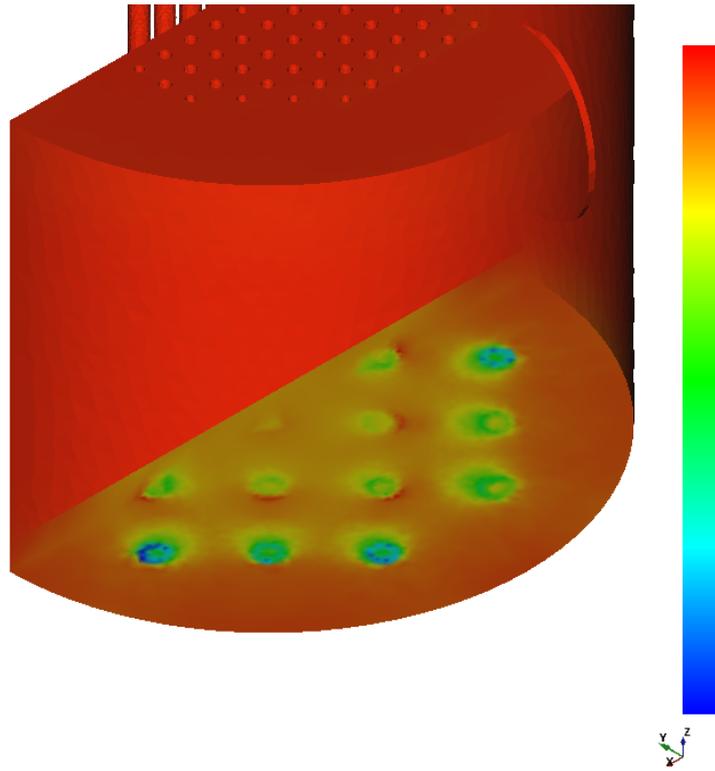
**Figura 4.22:** Desplazamiento por factor 10 de la zona del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia



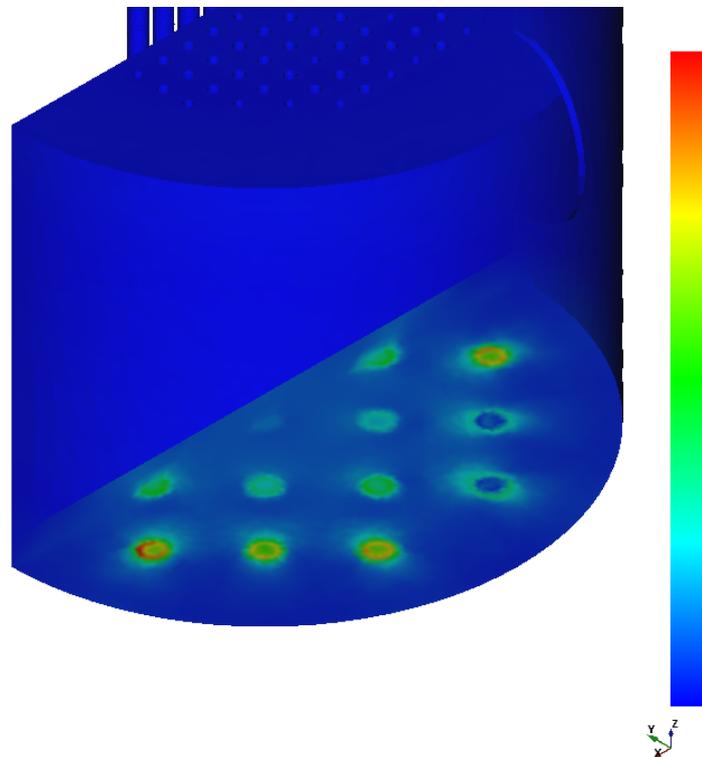
**Figura 4.23:** Esfuerzos de Von Mises en la base del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.24:** Esfuerzos principales máximos en la base del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.25:** Esfuerzos principales mínimos en la base del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.26:** Esfuerzos cortantes máximos en la base del quemador seccionada.  
Fuente: Elaboración propia

# 5 Conclusiones

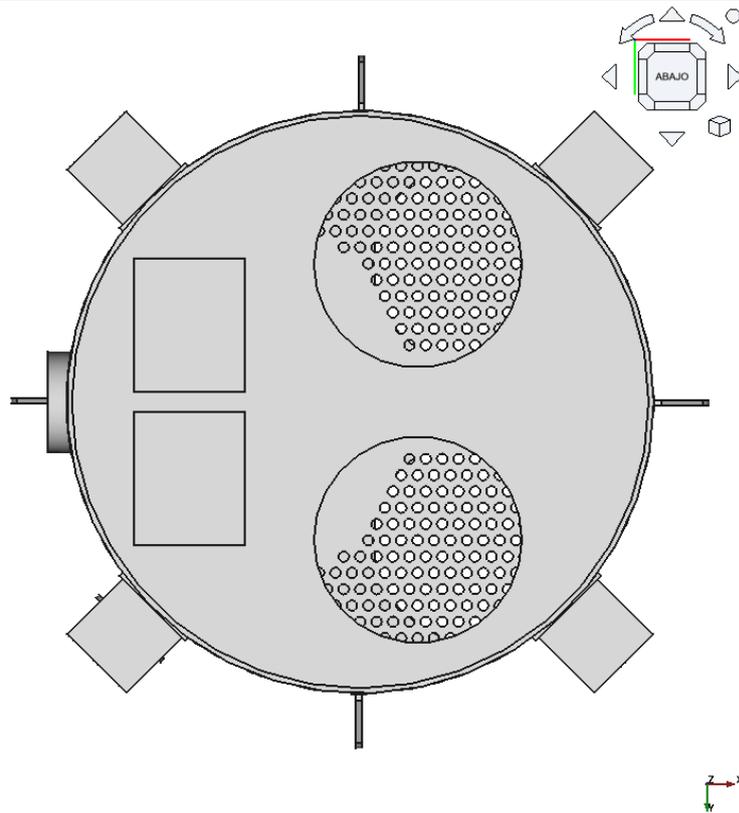
1. Aunque se ha conseguido modelar en 3D satisfactoriamente la caldera de recuperación utilizando *FreeCAD*, sería recomendable tratar de optimizar el diseño del conjunto de sólidos para evitar problemas de mallado en el banco de trabajo *FEM*.
2. Un análisis termo-mecánico de elementos a gran escala no puede realizarse sin un ordenador con suficiente potencia gráfica. Por esta razón, los dos análisis termo-mecánicos se limitaron a la zona del quemador y a un tubo específico.
3. El escenario más crítico analizado es el encendido del quemador con la caldera en frío. Aunque ambos escenarios superan los límites en los tres tipos de esfuerzos estudiados, el primer escenario resulta particularmente severo.
4. La zona más afectada son las bases del hogar: en ambos escenarios y en todos los tipos de esfuerzos evaluados, esta área ha superado con creces los valores límites del material, indicando que son los puntos más vulnerables de la estructura ante la eventualidad de que se repitan estas situaciones en la operación de la caldera.
5. No seguir adecuadamente los procedimientos de calentamiento de la caldera (en el caso del *Escenario 1*), o no esperar a que la temperatura y la presión de vapor se reduzcan correctamente (*Escenario 2*), puede provocar daños estructurales por acumulación de daños, especialmente en estos puntos críticos de la estructura.



# Anexos

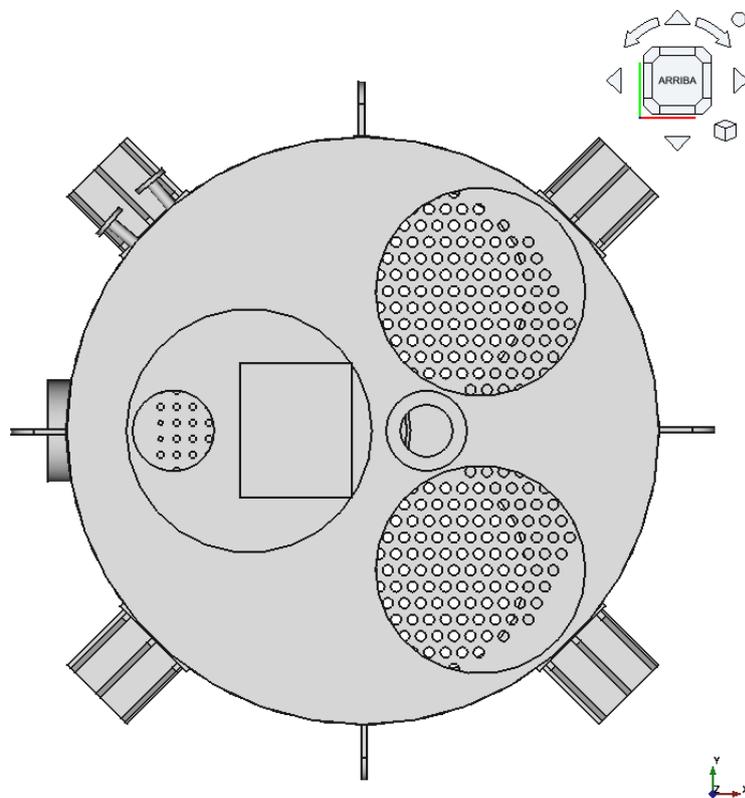


# A Vistas del modelo 3D de la caldera



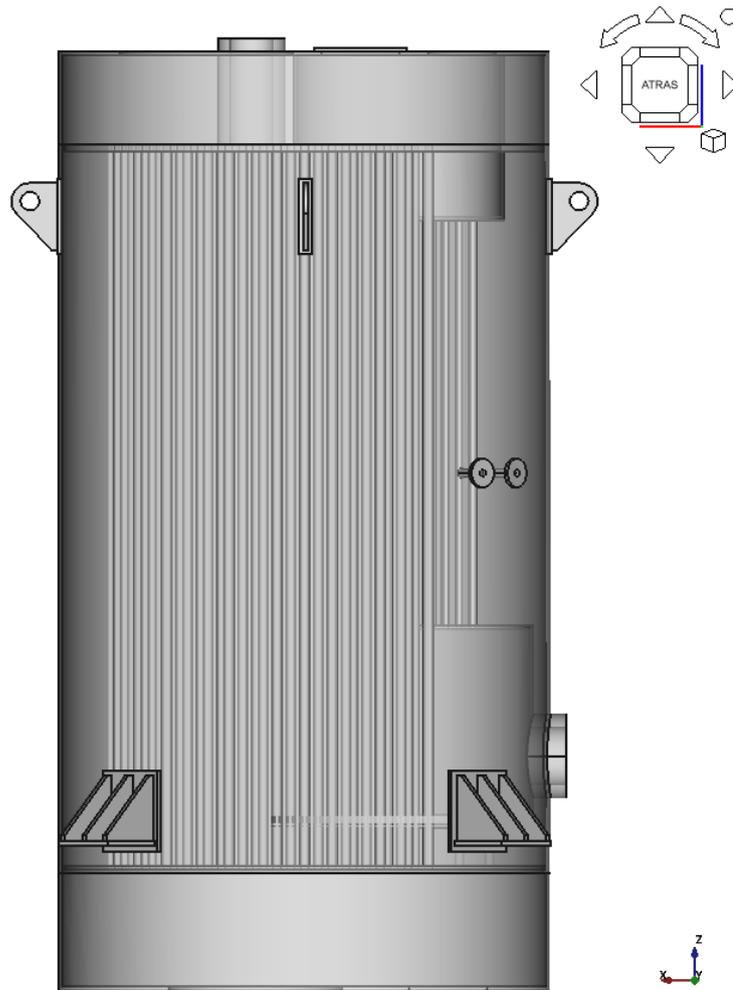
**Figura A.1:** Vista en planta inferior de la caldera.

Fuente: Elaboración propia



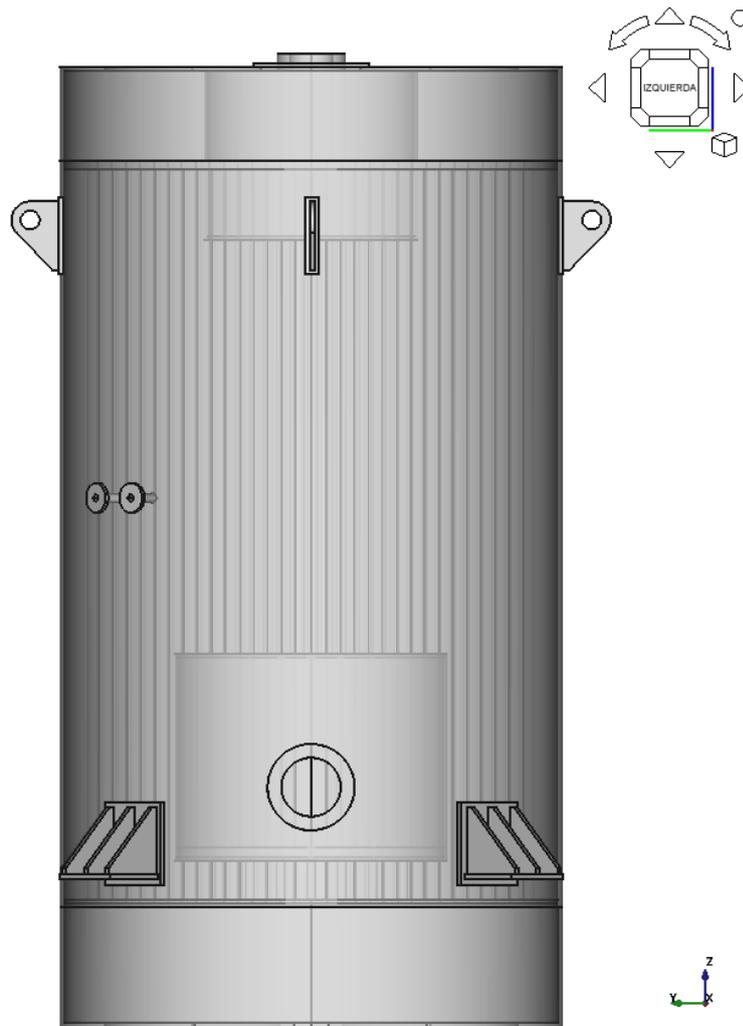
**Figura A.2:** Vista en planta superior de la caldera.

Fuente: Elaboración propia



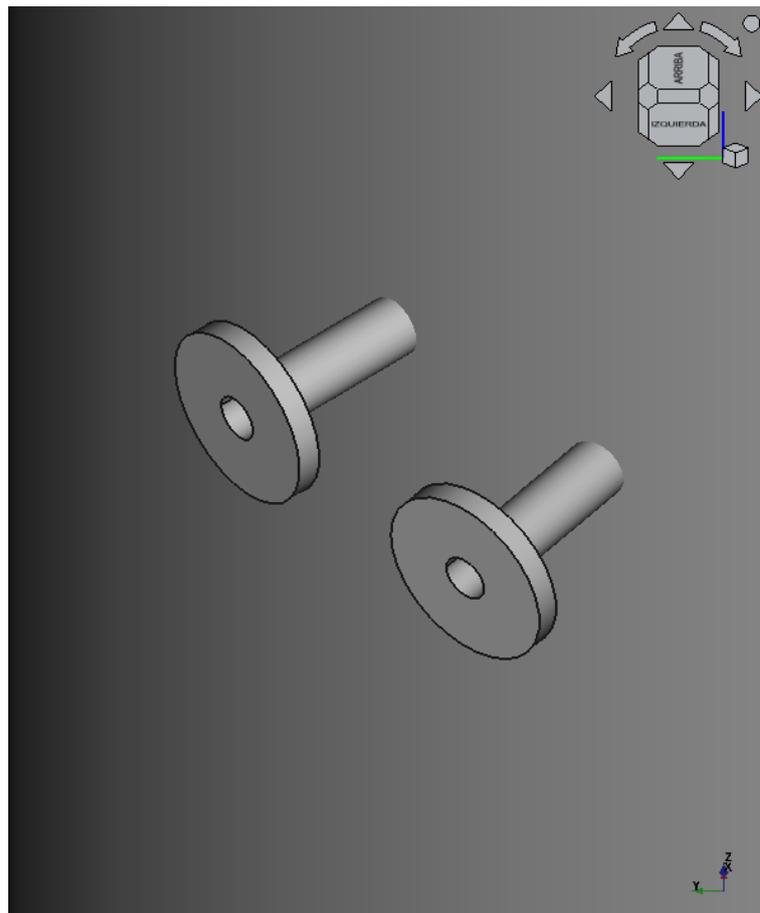
**Figura A.3:** Vista de alzado trasero de la caldera con el ajuste de los sólidos al 50 % de transparencia.

Fuente: Elaboración propia

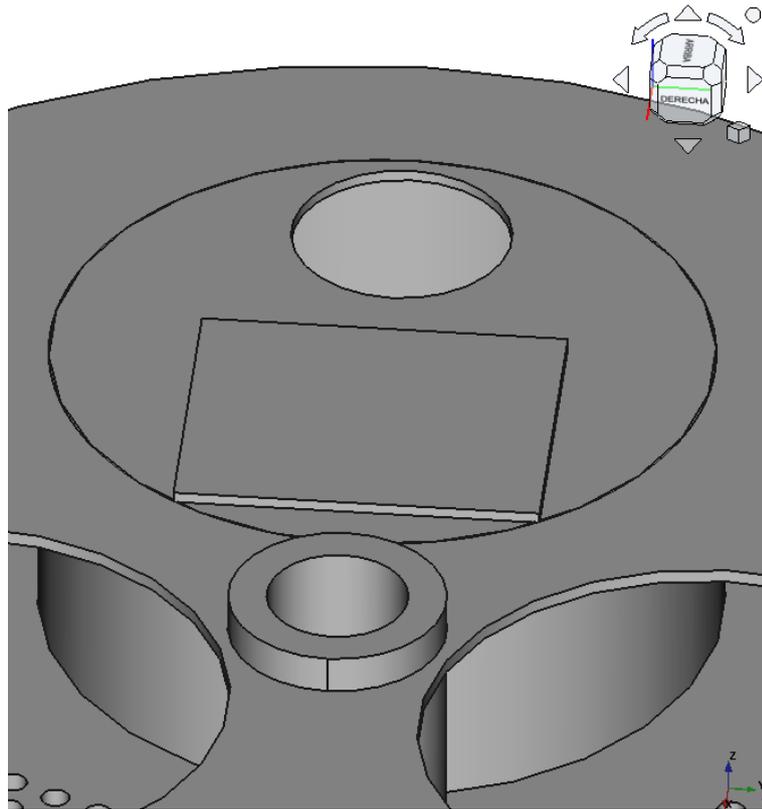


**Figura A.4:** Vista de perfil izquierdo de la caldera con el ajuste de los sólidos al 50 % de transparencia.

Fuente: Elaboración propia



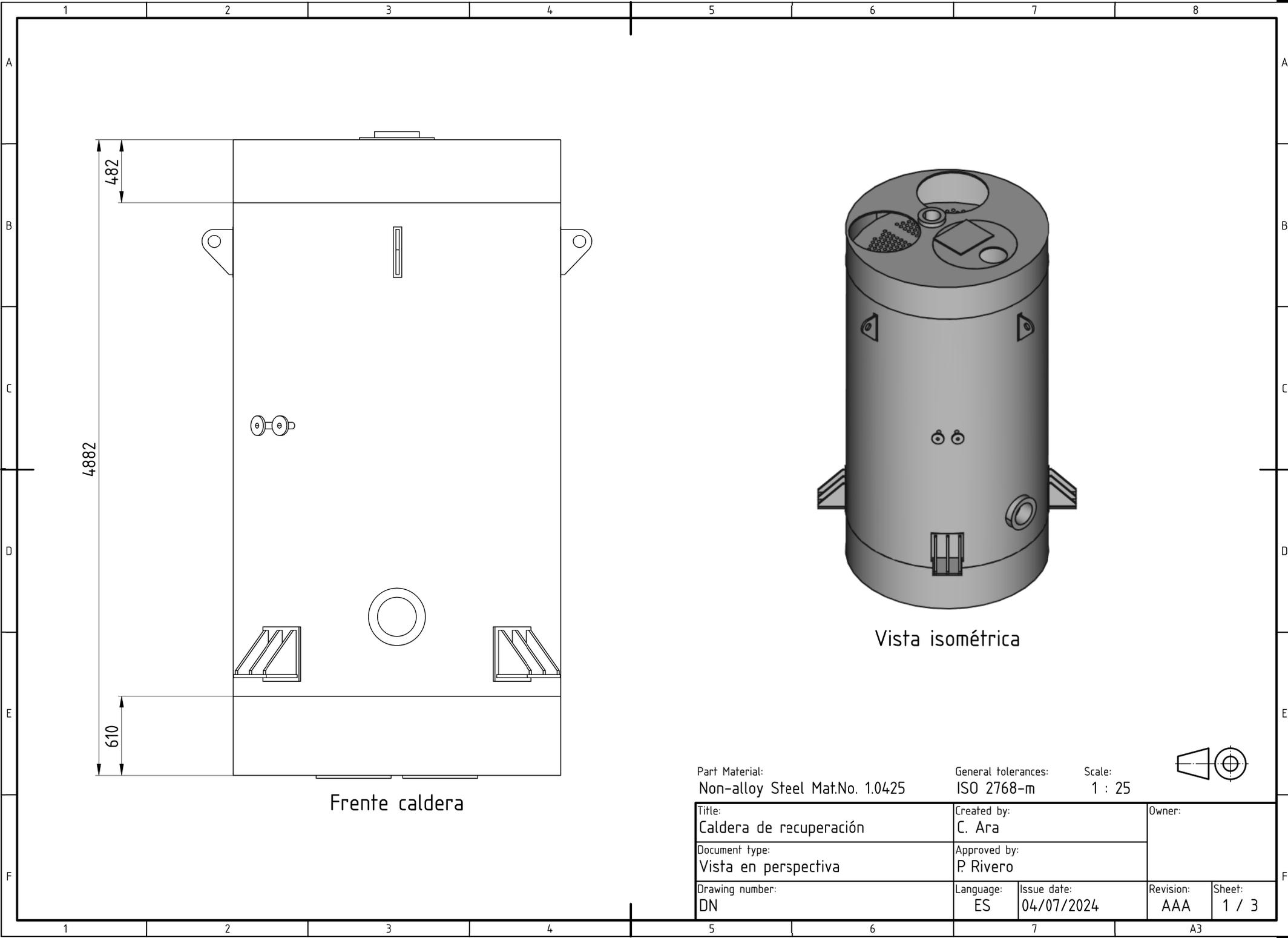
**Figura A.5:** Entrada de agua desde la cisterna a la caldera.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura A.6:** Salida de los gases de escape del quemador (arriba) y salida del vapor hacia todo el sistema de calefacción.

Fuente: Elaboración propia

## B Planos de la caldera con el banco de trabajo *TechDraw*

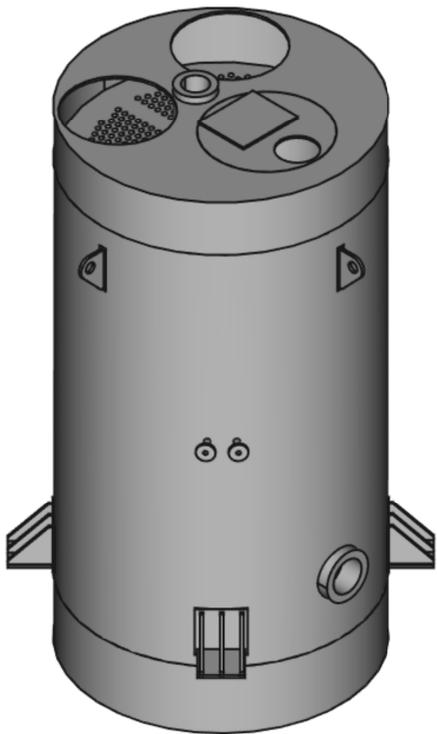


482

4882

610

Frente caldera

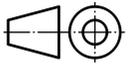


Vista isométrica

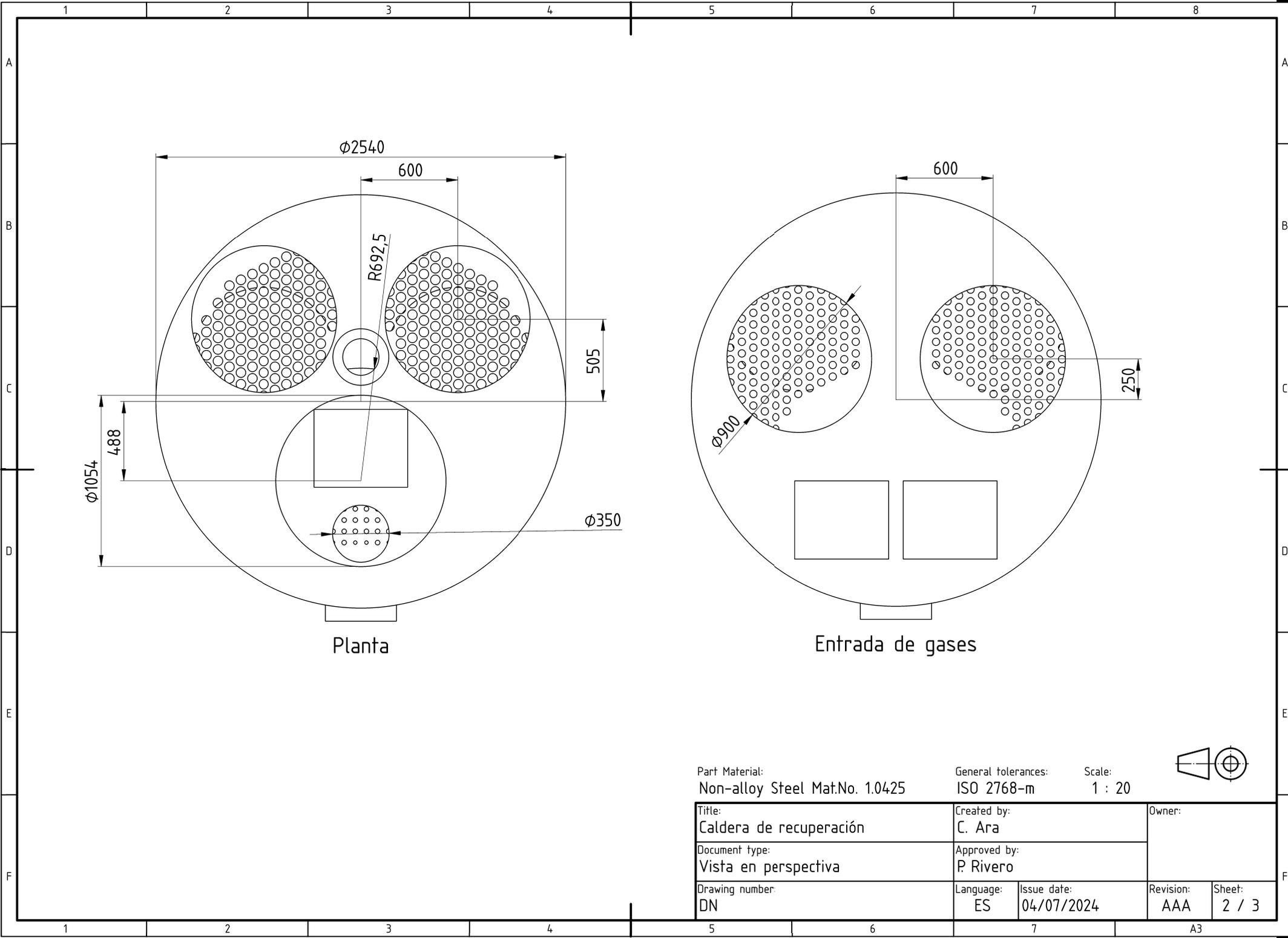
Part Material:  
Non-alloy Steel Mat.No. 1.0425

General tolerances:  
ISO 2768-m

Scale:  
1 : 25



Title: Caldera de recuperación		Created by: C. Ara		Owner:	
Document type: Vista en perspectiva		Approved by: P. Rivero			
Drawing number: DN		Language: ES	Issue date: 04/07/2024	Revision: AAA	Sheet: 1 / 3

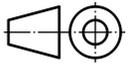


Planta

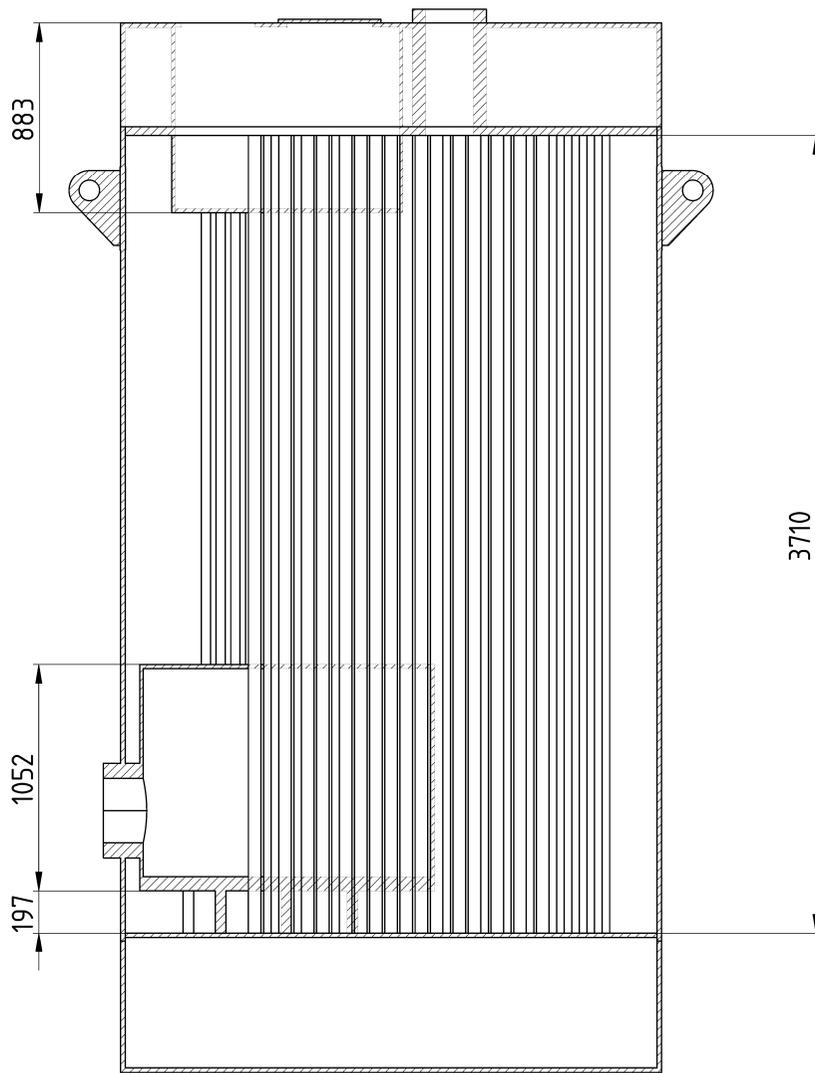
Entrada de gases

Part Material:  
Non-alloy Steel Mat.No. 1.0425

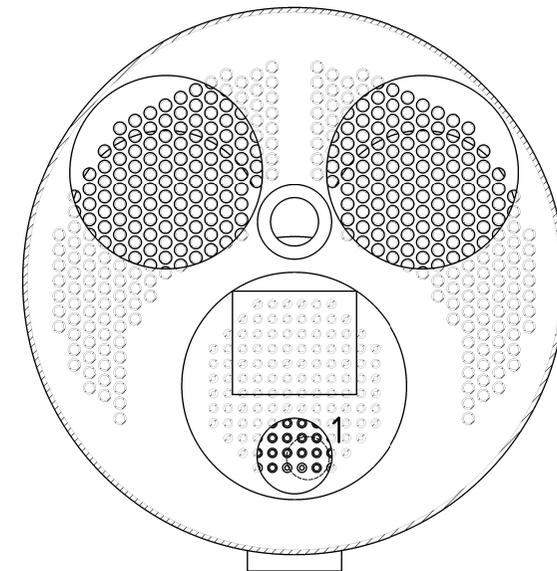
General tolerances: ISO 2768-m  
Scale: 1 : 20



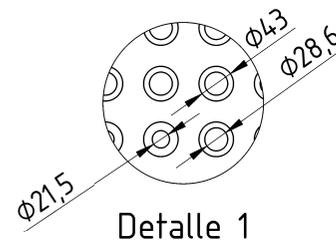
Title: Caldera de recuperación		Created by: C. Ara		Owner:	
Document type: Vista en perspectiva		Approved by: P. Rivero			
Drawing number: DN		Language: ES	Issue date: 04/07/2024	Revision: AAA	Sheet: 2 / 3



Alzado en sección



Planta en sección

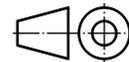


Detalle 1

Part Material:  
Non-alloy Steel Mat.No. 1.0425

General tolerances:  
ISO 2768-m

Scale:  
1 : 25



Title: Caldera de recuperación		Created by: C. Ara		Owner:	
Document type: Vista en perspectiva		Approved by: P. Rivero			
Drawing number: DN		Language: ES		Issue date: 04/07/2024	
		Revision: AAA		Sheet: 3 / 3	

# C Resultados en CCX

## C.1 Archivo de entrada de CalculiX del *Escenario 1*

```
0.0: Check dependencies...
79.3: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.21/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file: C:/Users/Carmen/Desktop/Análisis1/SolverCcxTools /FEMMeshNetgen.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
56.1: CalculiX stopped.
56.1: *****
CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt
CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free
software, and you are welcome to redistribute it under
certain conditions, see gpl.htm
*****
You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020
The numbers below are estimated upper bounds
number of:
nodes: 68117
elements: 377268
one-dimensional elements: 0
two-dimensional elements: 0
integration points per element: 27
degrees of freedom per node: 3
layers per element: 1
distributed facial loads: 32245
distributed volumetric loads: 0
concentrated loads: 0
single point constraints: 5154
multiple point constraints: 1
terms in all multiple point constraints: 1
tie constraints: 0
dependent nodes tied by cyclic constraints: 0
dependent nodes in pre-tension constraints: 0
sets: 7
terms in all sets: 1314523
materials: 1
constants per material and temperature: 2
temperature points per material: 1
plastic data points per material: 0
orientations: 0
amplitudes: 4
data points in all amplitudes: 4
print requests: 1
```

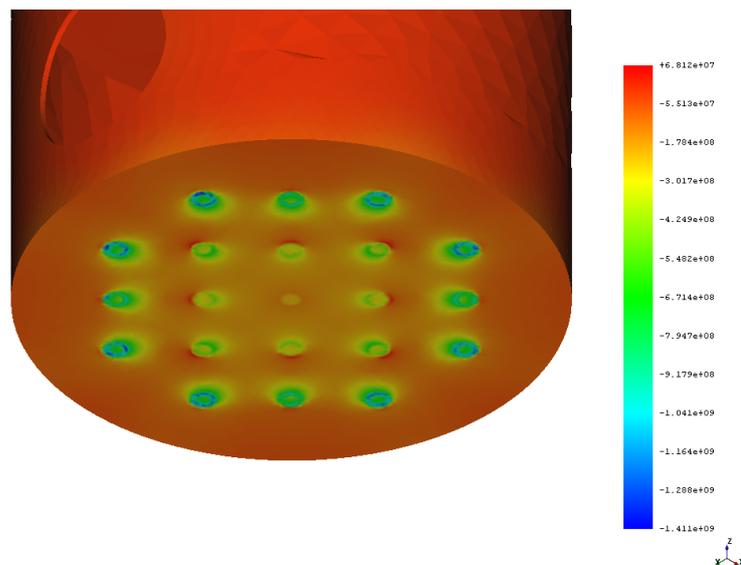
transformations: 0  
property cards: 0  
STEP 1  
Static analysis was selected  
Newton-Raphson iterative procedure is active  
Decascading the MPC's  
Determining the structure of the matrix:  
number of equations  
267314 number of nonzero lower triangular matrix elements  
4194908  
increment 1 attempt 1  
increment size= 1.000000e+00  
sum of previous increments=0.000000e+00  
actual step time=1.000000e+00  
actual total time=1.000000e+00  
iteration 1  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.  
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver  
Using up to 16 cpu(s) for spooles.  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
average force= 675.051599  
time avg. forc= 675.051599  
largest residual force= 3410411.071701 in node 7295 and dof 1  
largest increment of disp= 1.045488e+00  
largest correction to disp= 1.045488e+00 in node 27527 and dof 1  
average flux= 12.347394  
time avg. flux= 12.347394  
largest residual flux= 0.000000 in node 1167 and dof 0  
largest increment of temp= 7.890921e+02  
largest correction to temp= 7.890921e+02 in node 17966 and dof 0  
no convergence  
iteration 2  
Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.  
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver  
Using up to 16 cpu(s) for spooles.  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
average force= 6455.844196  
time avg. forc= 6455.844196  
largest residual force= 9589162.423734 in node 19813 and dof 3  
largest increment of disp= 3.827708e+00  
largest correction to disp= 3.827708e+00 in node 18539 and dof 2  
average flux= 12.347394  
time avg. flux= 12.347394  
largest residual flux= 0.000000 in node 1171 and dof 0  
largest increment of temp= 7.890921e+02  
largest correction to temp= 9.794164e-11 in node 27481 and dof 0  
no convergence  
iteration 3  
Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.  
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver  
Using up to 16 cpu(s) for spooles.  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
average force= 1061.945771

```

time avg. forc= 1061.945771
largest residual force= 0.000000 in node 7053 and dof 2
largest increment of disp= 7.061573e+00
largest correction to disp= 7.061573e+00 in node 1775 and dof 1
average flux= 12.347394
time avg. flux= 12.347394
largest residual flux= 0.000000 in node 1166 and dof 0
largest increment of temp= 7.890921e+02
largest correction to temp= 2.808749e-13 in node 1169 and dof 0
convergence
the increment size exceeds the remainder of the step and is decreased to
0.000000e+00
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.
Job finished
56.1: CalculiX done without error!
56.1: Loading result sets...

```

## C.2 Resultados gráficos del *Escenario 1*



**Figura C.1:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos de la base del hogar del *Escenario 1*.

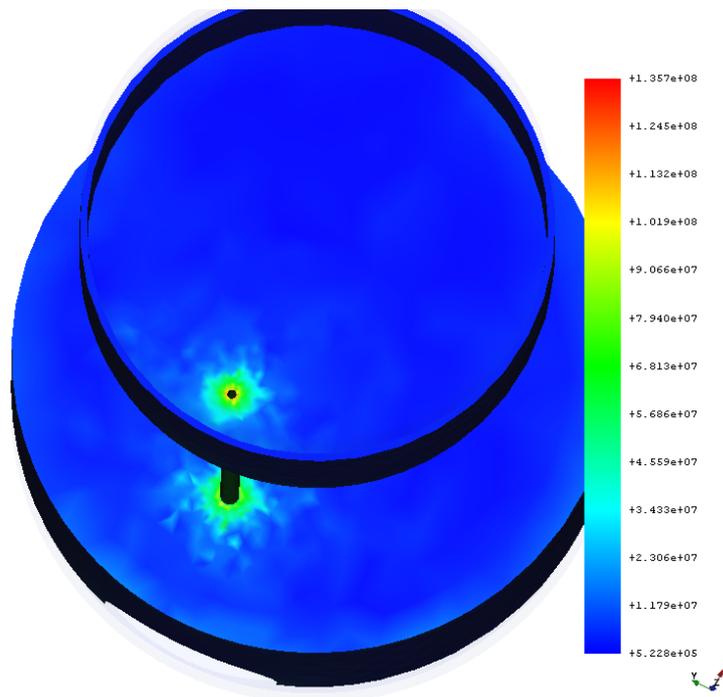
Fuente: Elaboración propia

## C.3 Archivo de entrada de CalculiX del *Escenario 2*

```

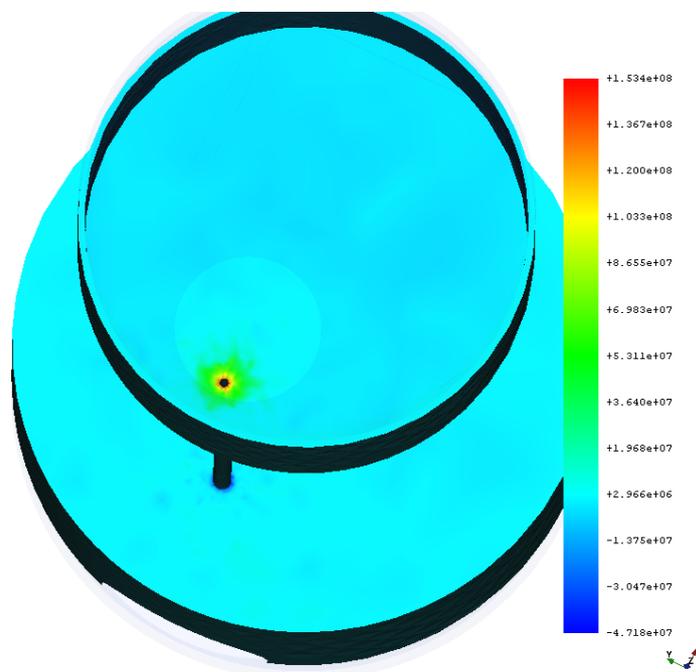
0.0: Check dependencies...
56.0: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.21/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file: C:/Users/Carmen/Desktop/Análisis2/SolverCcxTools /FEMMeshNetgen.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
30.5: CalculiX stopped.
30.5: *****

```



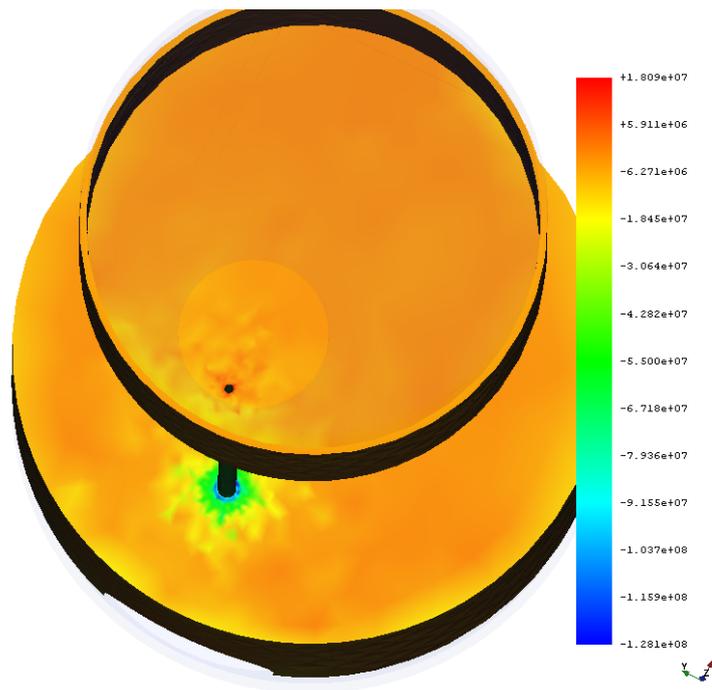
**Figura C.2:** Resultado gráfico de los esfuerzos de Von Mises ejercidos en el tubo del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia



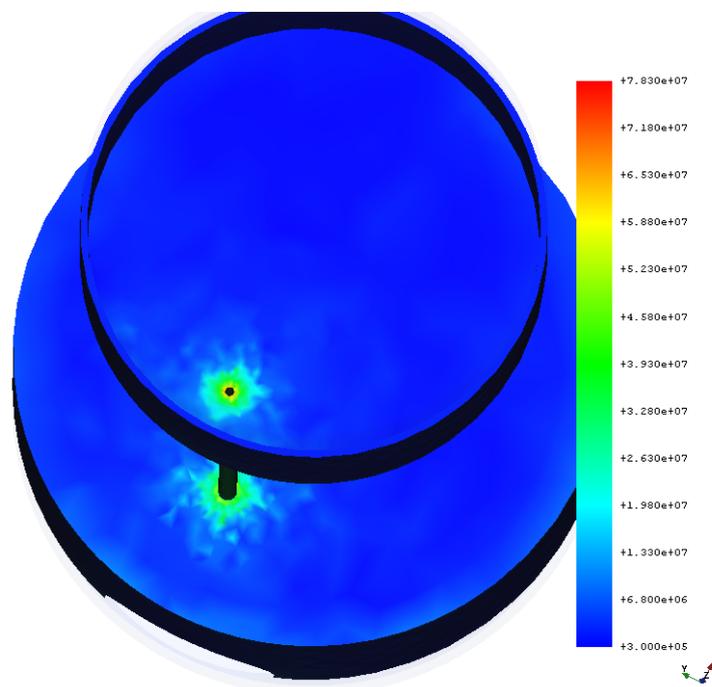
**Figura C.3:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos ejercidos en el tubo del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.4:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos ejercidos en el tubo del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.5:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes ejercidos en el tubo del *Escenario 1*.

Fuente: Elaboración propia

CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt  
 CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free  
 software, and you are welcome to redistribute it under  
 certain conditions, see [gpl.htm](#)

\*\*\*\*\*

You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020

The numbers below are estimated upper bounds

number of:

nodes: 68117

elements: 377268

one-dimensional elements: 0

two-dimensional elements: 0

integration points per element: 27

degrees of freedom per node: 3

layers per element: 1

distributed facial loads: 32245

distributed volumetric loads: 0

concentrated loads: 0

single point constraints: 5154

multiple point constraints: 1

terms in all multiple point constraints: 1

tie constraints: 0

dependent nodes tied by cyclic constraints: 0

dependent nodes in pre-tension constraints: 0

sets: 7

terms in all sets: 1314523

materials: 1

constants per material and temperature: 2

temperature points per material: 1

plastic data points per material: 0

orientations: 0

amplitudes: 4

data points in all amplitudes: 4

print requests: 1

transformations: 0

property cards: 0

STEP 1

Static analysis was selected

Newton-Raphson iterative procedure is active

Decascading the MPC's

Determining the structure of the matrix:

number of equations

267314

number of nonzero lower triangular matrix elements

4194908

increment 1 attempt 1

increment size= 1.000000e+00

sum of previous increments=0.000000e+00

actual step time=1.000000e+00

actual total time=1.000000e+00

iteration 1

Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.

Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.

Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.

Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver

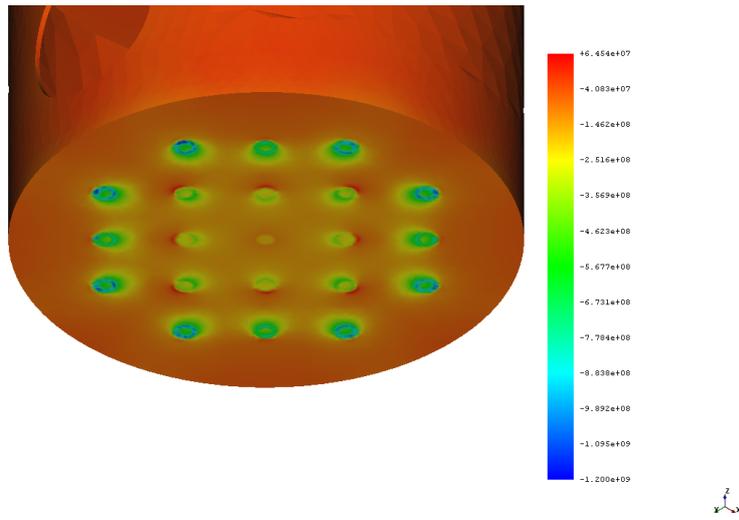
Using up to 16 cpu(s) for spooles.

Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.

Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.

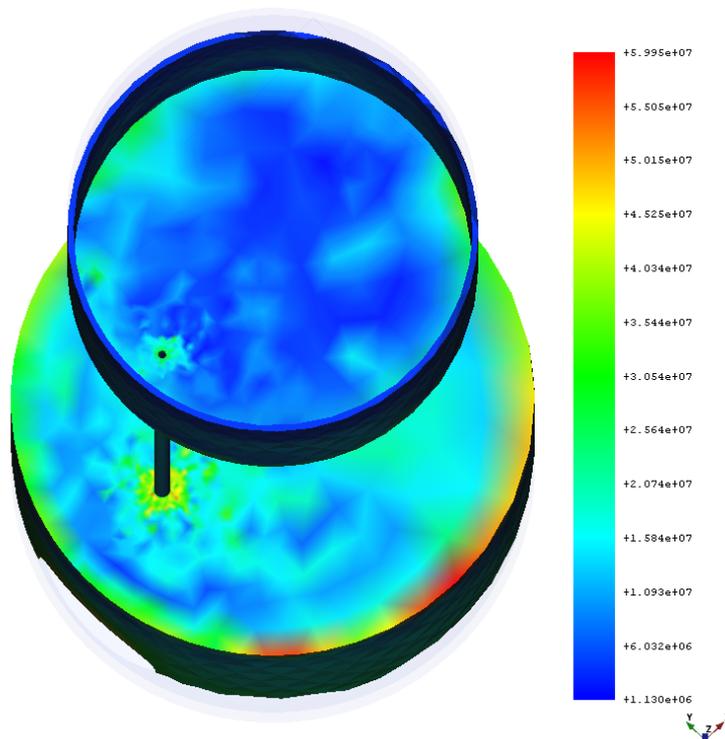
average force= 693.659677  
time avg. forc= 693.659677  
largest residual force= 2839221.565769 in node 7295 and dof 1  
largest increment of disp= 7.318415e+00  
largest correction to disp= 7.318415e+00 in node 27527 and dof 1  
average flux= 10.222746  
time avg. flux= 10.222746  
largest residual flux= 0.000000 in node 1700 and dof 0  
largest increment of temp= 6.569317e+02  
largest correction to temp= 6.569317e+02 in node 17966 and dof 0  
no convergence  
iteration 2  
Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.  
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver  
Using up to 16 cpu(s) for spooles.  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
average force= 5426.821452  
time avg. forc= 5426.821452  
largest residual force= 7983194.587492 in node 19813 and dof 3  
largest increment of disp= 7.318415e+00  
largest correction to disp= 3.186628e+00 in node 18539 and dof 2  
average flux= 10.222746  
time avg. flux= 10.222746  
largest residual flux= 0.000000 in node 1169 and dof 0  
largest increment of temp= 6.569317e+02  
largest correction to temp= 8.172690e-11 in node 27311 and dof 0  
no convergence  
iteration 3  
Using up to 16 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.  
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver  
Using up to 16 cpu(s) for spooles.  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
average force= 965.677886  
time avg. forc= 965.677886  
largest residual force= 0.000000 in node 1166 and dof 2  
largest increment of disp= 7.318415e+00  
largest correction to disp= 5.880333e+00 in node 1775 and dof 1  
average flux= 10.222746  
time avg. flux= 10.222746  
largest residual flux= 0.000000 in node 19010 and dof 0  
largest increment of temp= 6.569317e+02  
largest correction to temp= 3.535834e-13 in node 8218 and dof 0  
convergence  
the increment size exceeds the remainder of the step and is decreased to  
0.000000e+00  
Using up to 16 cpu(s) for the stress calculation.  
Using up to 16 cpu(s) for the heat flux calculation.  
Job finished  
30.6: CalculiX done without error!  
30.6: Loading result sets...

## C.4 Resultados gráficos del *Escenario 2*



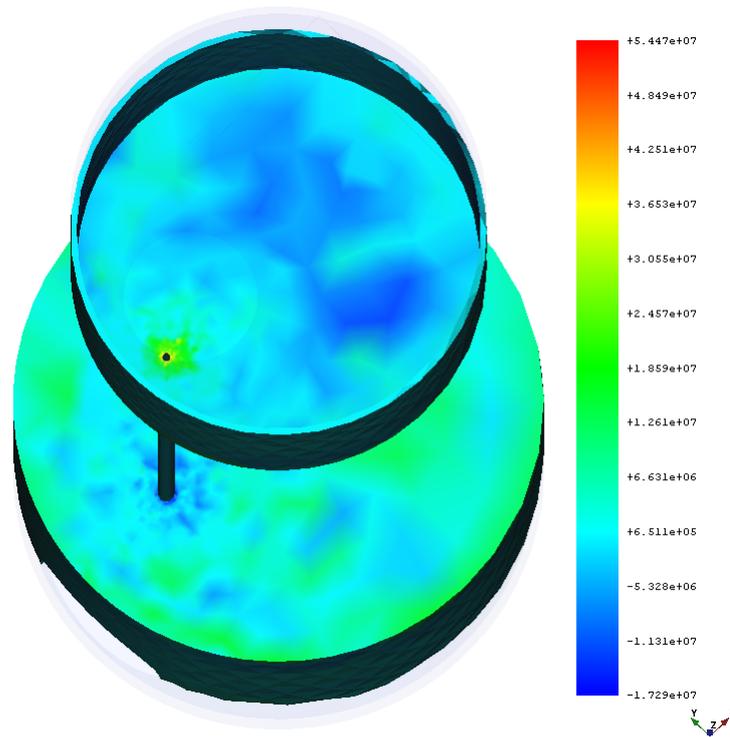
**Figura C.6:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos de la base del hogar del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



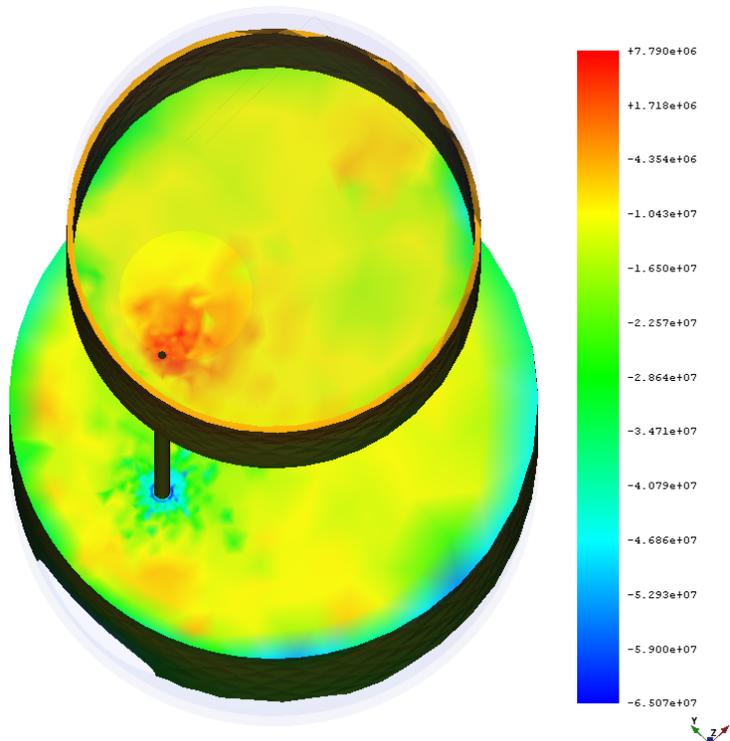
**Figura C.7:** Resultado gráfico de los esfuerzos de Von Mises ejercidos en el tubo del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



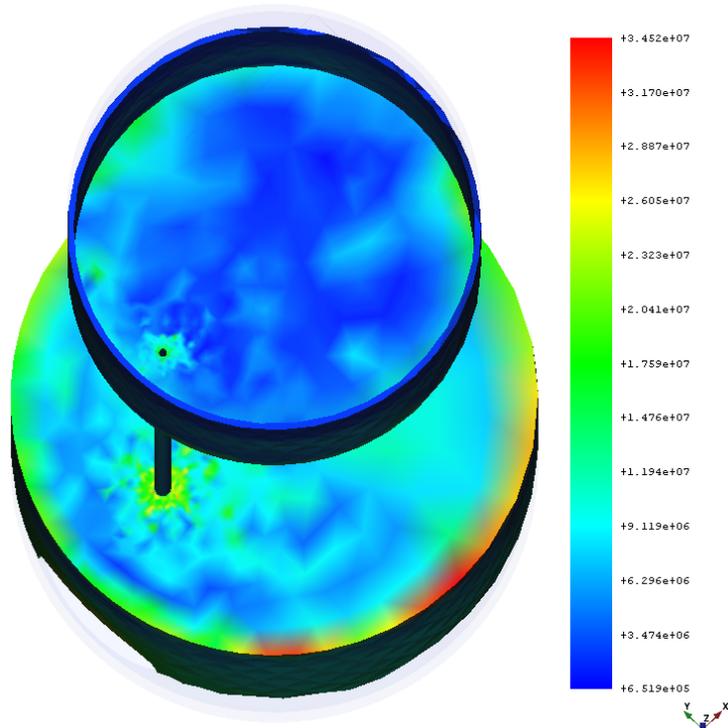
**Figura C.8:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales máximos ejercidos en el tubo del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.9:** Resultado gráfico de los esfuerzos principales mínimos ejercidos en el tubo del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.10:** Resultado gráfico de los esfuerzos cortantes ejercidos en el tubo del *Escenario 2*.

Fuente: Elaboración propia

# Bibliografía

- [1] COLABORADORES DE WIKIPEDIA, “Barco de vapor”. URL [https://es.wikipedia.org/wiki/Barco\\_de\\_vapor](https://es.wikipedia.org/wiki/Barco_de_vapor).
- [2] COLABORADORES DE WIKIPEDIA, “Temperatura”. URL <https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura#:~:text=La%20temperatura%20es%20una%20magnitud,principio%20cero%20de%20la%20termodin%C3%A1mica>.
- [3] FREECAD, “FreeCAD: Tu propio modelador paramétrico 3D”. URL [https://www.freecad.org/features.php?lang=es\\_ES](https://www.freecad.org/features.php?lang=es_ES).
- [4] MAKEITFROM.COM, “EN 1.0425 (P265GH) Non-Alloy Steel”. URL <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0425-P265GH-Non-Alloy-Steel>.
- [5] MIRLIENNA, G. G., “¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación?” URL <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>.
- [6] STUDYSMARTER, “Principal Stress: Meaning, Examples, formula StudySmarter”. URL <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/solid-mechanics/principal-stress/#:~:text=Principal%20stress%20refers%20to%20the%20maximum%20and%20minimum%20stresses%20that,material's%20maximum%20possible%20stress%20loading>.
- [7] STUDYSMARTER, “Von Mises and Tresca Criteria: yield formula, example”. URL <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/materials-engineering/von-mises-and-tresca-criteria/#:~:text=Tresca%20stress%20is%20calculated%20by,stress%20%2D%20Minimum%20principal%20stress>.
- [8] WANATOP, W., “Diferencias entre caldera pirotubular y acuotubular”. URL <https://www.cerney.es/noticias/diferencias-entre-caldera-pirotubular-y-acuotubular/>.
- [9] ZAPATA, F., “Esfuerzo cortante”. URL <https://www.lifeder.com/esfuerzo-cortante/>.
- [10] ŽELEZIARNE PODBREZOVÁ A.S., “Tubos aptos para equipos energéticos - Tubos aptos para calderas a temperatura elevada”. 2024. URL <https://www.tubosdeacero.eu/tubos-de-calderas/>.