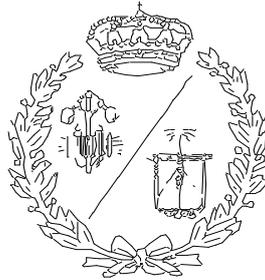


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA
REFRIGERACIÓN DE UN ALMACÉN SECO
DE RESIDUOS RADIATIVOS**

(NUMERICAL ANALYSIS OF THE DRY STORAGE REFRIGERATION OF
RADIOACTIVE WASTE)

Para acceder al Título de
**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Enrique Cuétara Gama

Enero-2018

A mi familia.

A mis compañeros de clase.

A mis amigos.

A mi tutor, D. Fernando Delgado San Román.

ÍNDICE GENERAL

Documento N°1: Memoria

Documento N°2: Anexos

Documento N°3: Planos



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. ALCANCE

3. ANTECEDENTES

3.1 SISTEMA WESTINGHOUSE

3.2 SISTEMA DE SEGURIDAD PASIVO REFRIGERADO POR AIRE

4. RADIATIVIDAD

4.1 TIPOS DE RADIACIÓN

4.1.1 Radiación y desintegración Alfa

4.1.2 Radiación y desintegración Beta

4.1.3 Radiación Gamma

5. TRANSFERENCIA DE CALOR

5.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

6. MECÁNICA DE FLUIDOS

6.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

6.2 FLUJO LAMINAR



7. ALMACÉN TEMPORAL CENTRALIZADO

7.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TEMPORAL

7.1.1 Partes del ATC

7.1.2 Centro tecnológico asociado

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE GASTADO

7.2.1 Radio toxicidad Residuos radiactivos de periodo largo

7.3 CICLOS DE GESTIÓN

7.3.1 Ciclo abierto

7.3.2 Ciclo cerrado

8. MODELO DE SIMULACIÓN

8.1 INTRODUCCIÓN

8.2 ELEMENTO FINITOS(CEF)

8.3 COMSOL MULTIPHYSICS

8.3.1 Pantallas iniciales

8.4 GEOMETRIA

8.4.1 Simplificaciones del modelo geométrico

8.4.2 Geometría del modelo

8.4.3 Geometría base del modelo

8.4.4 Geometría con refrigeración natural lateral

8.4.5 Geometría con refrigeración forzada lateral

8.4.6 Definiciones

8.5 MATERIALES

8.5.1 Materiales del modelo



8.6 CONDICIONES DE CONTORNO

8.6.1 Simplificaciones de las condiciones de contorno

8.6.2 Transferencia de calor

8.6.3 Flujo laminar

8.7 MALLADO

8.7.1 Mallado del modelo

8.7.2 Histograma del mallado

8.8 CÁLCULO DE LA SIMULACIÓN

8.8.1 Solver utilizado

8.8.2 Barrido paramétrico

8.8.3 RAM necesaria

8.8.4 Tiempo de computación

8.8.5 Error obtenido

8.9 REFRIGERACIÓN CON VENTILADORES

9. RESULTADOS

9.1 TABLA RESUMEN DE TEMPERATURAS, VELOCIDADES Y
PRESIONES

9.2 MODELO BASE

9.2.1 Distribución de temperaturas

9.2.2 Distribución de la velocidad

9.3 MODELO II (REFRIGERACIÓN NATURAL)

9.3.1 Distribución de temperaturas

9.3.2 Distribución de la velocidad



9.4 MODELO III (REFRIGERACIÓN FORZADA)

9.4.1 Distribución de temperaturas

9.4.2 Distribución de velocidades con velocidad de
entrada de 0,3 m/s

10. CONCLUSIONES

10.1 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN

10.2 MEJORAS

11. BIBLIOGRAFIA



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Piscina para el almacenamiento temporal de contenedores de combustible gastado

Figura 1.2 Contenedores de combustible nuclear gastado. Fuente: NRC

Figura 3.1 Sistema de emergencia de Westinghouse

Figura 3.2 Módulo flotante

Figura 3.3 Esquema del sistema del estudio de KTH

Figura 3.4 Vista del sistema del estudio de KTH

Figura 4.1 Desintegración alfa

Figura 4.2 Desintegración Beta menos, (β^-)

Figura 4.3 Desintegración Beta más, (β^+)

Figura 4.4 Representación del proceso de captura electrónica

Figura 4.5 Emisión de rayos X por caída de electrón orbital

Figura 5.1 Expresión de la transferencia de calor por conducción

Ecuación 5.2 Ley de conducción de calor de Fourier

Figura 5.3 Gráfica que muestra la recta tangente a la curva que sigue la ley de conducción de calor de Fourier

Figura 5.4: Transferencia de calor por conducción desde el hierro a la mano

Ecuación 5.5: Ley de transferencia de calor por convección

Figura 5.6 Expresión resistencia térmica convectiva

Figura 5.7: Transferencia de calor por convección del agua del interior del recipiente



Figura 6.1 Campo de velocidades en régimen laminar

Figura 7.1 Planta de la disposición de la planta de almacén temporal
centralizado (ATC)

Figura 7.2 Esquema de la disposición del recinto del ATC de Villar de
Cañas

Figura 7.3 Parte del ATC, destaca el módulo de almacenamiento.

Fuente: Enresa.

Figura 7.4 Evolución del material radiactivo en el tiempo. Fuente: CEA

Figura 7.5 Se observa la combinación del ciclo cerrado y el ciclo abierto,
una vez pasa el combustible gastado al ATC. Fuente: Enusa

Figura 8.1 Simulación de la temperatura de un pistón mediante elementos
finitos

Figura 8.2 Pantalla asistente de modelo

Figura 8.3 Pantalla elección de dimensiones

Figura 8.4 Pantalla elección de físicas

Figura 8.5 Pantalla estudio temporal

Figura 8.6 Geometría del proyecto

Figura 8.7 Geometría base del modelo de simulación

Figura 8.8 Geometría con entrada lateral y refrigeración natural

Figura 8.9 Geometría con entrada lateral, refrigeración forzada

Figura 8.10 Especificaciones de la simulación

Figura 8.11 Sonda para medir la temperatura de salida

Figura 8.12 Sonda para medir la velocidad de salida

Figura 8.13 Sonda para medir la temperatura máxima

Figura 8.14 Gráfica de la densidad del aire



Figura 8.15 Viscosidad cinemática del aire

Figura 8.16 Propiedades del aire en la simulación

Figura 8.17 Propiedades del Aluminio

Figura 8.18 Propiedades del acero

Figura 8.19 Propiedades del hormigón

Figura 8.20 Definición de los parámetros globales

Figura 8.21 Asignación del dominio "aire"

Figura 8.22 Selección de las fuentes de calor

Figura 8.23 Selección de la temperatura de entrada

Figura 8.24 Selección del flujo de salida del calor

Figura 8.25 Selección de las condiciones convectivas en paredes verticales

Figura 8.26 Selección de las condiciones convectivas en pared horizontal superior

Figura 8.27 Condición de contorno abierto

Figura 8.28 Contorno abierto en orificios de salida

Figura 8.29 Condición de simetría en transferencia de calor

Figura 8.30 Selección del flujo laminar de entrada

Figura 8.31 Flujo de salida del aire

Figura 8.32 Condición de simetría en flujo laminar

Figura 8.33 Comando "Multifísica" para el acoplamiento de las distintas físicas

Figura 8.34 Calidad del mallado

Figura 8.35 Mallado del modelo

Figura 8.36 Mallado de los contenedores de combustible gastado



Figura 8.37 Estadísticas del mallado

Figura 8.38 Histograma del mallado

Figura 8.39 Características del solver “Segregado”

Figura 8.40: Ajustes del barrido paramétrico

Figura 8.41 Memoria RAM utilizada (Memoria física/memoria virtual)

Figura 8.42 Tiempo de computación

Figura 8.43 Error en la simulación, convergencia

Figura 9.1: Tabla resumen de temperaturas y velocidades

Figura 9.2: Distribución de temperatura modelo I en el plano de simetría

Figura 9.3: Perspectiva del almacén donde se muestran la distribución de
temperaturas del modelo I

Figura 9.4: Distribución de temperatura del modelo I en el plano situado
en la fila de contenedores más cercana a la entrada del aire

Figura 9.5: Corte de la velocidad en el plano de simetría modelo base

Figura 9.6: Distribución de velocidad en modelo base (Imagen ampliada
de la boca de salida)

Figura 9.6: Distribución de temperatura del modelo II

Figura 9.7: Distribución de la temperatura del modelo II de la
refrigeración natural en el plano de simetría

Figura 9.8: Distribución de temperatura del modelo II de refrigeración
natural visto desde la parte inferior del almacén

Figura 9.9: Corte de velocidad del modelo II de refrigeración natural con
el corte situado en el plano de simetría.

Figura 9.10: Imagen ampliada de la velocidad de entrada del aire en el
modelo II



Figura 9.11: Ampliación de la velocidad de salida del aire en el modelo II

Figura 9.12: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada nula

Figura 9.13: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,1m/s

Figura 9.14: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,2m/s

Figura 9.15: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,3m/s

Figura 9.16: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,4m/s

Figura 9.17: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,3m/s

Figura 9.18: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,3m/s (2)

Figura 9.19: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,4m/s

Figura 9.17: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,5m/s

Figura 9.18: Campo de velocidades de salida con ventilador



1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente proyecto se va a tratar acerca de la refrigeración de los contenedores que albergan combustible nuclear gastado una vez han sido almacenados en los almacenes temporales centralizados, lo que conlleva estudiar las condiciones en las que dicho combustible se almacena y las temperaturas en las que lo encontramos.



Figura 1.1: Piscina para el almacenamiento temporal de contenedores de combustible gastado

Se va a usar el programa de simulación COMSOL, el cual ofrece un amplio abanico de posibilidades en cuanto a diferentes físicas de estudio se refiere. Será necesario realizar una serie de simplificaciones para la mejor visualización del trabajo para, por último, obtener unas conclusiones extraídas de los resultados que las diferentes simulaciones nos van a dar.

Para dicho proyecto, se van a tener una serie de contenedores los cuales albergan residuos radiactivos en su interior, estos contenedores se encuentran en un almacén por el cual va a penetrar un fluido que en nuestro caso va a ser aire en continuo movimiento.



La capacidad del almacén es de 77 contenedores y la capacidad térmica eliminable es de 120 KW por cada contenedor del almacén, repartidos uniformemente por todo su volumen.



Figura 1.2: Contenedores de combustible nuclear gastado.

Fuente: Nuclear Regulatory Commission (NRC)

Por otra parte, cabe decir que el proyecto se ha realizado para unas condiciones específicas las cuales nos han parecido las correctas, se ha considerado los datos de temperatura y viento de la ciudad de Cuenca. Estas, variarán en función de la estación del año y la posición geográfica donde se encuentre el almacén.

Se van a realizar diferentes simulaciones para concluir cual es la más idónea, variando la posición de las entradas y salidas de aire, así como la forma de la entrada.

2. ALCANCE

Lo que se pretende con este proyecto es visualizar las temperaturas que se alcanzan en los contenedores una vez son almacenados con las condiciones anteriormente citadas y a partir de ahí, valorar si se debería estudiar la posibilidad de implantar un tipo de refrigeración forzada a pesar de que se eleve el precio de la instalación y consumo, o si, por el contrario, la refrigeración natural es suficiente para que se alcancen temperaturas aceptables.



3. ANTECEDENTES

En este apartado se a hablar resumidamente de proyectos y estudios previamente realizados, los cuales han sido la base y ayuda en la realización de nuestro trabajo. Aunque la energía nuclear es un tipo de energía "a extinguir" en España, debido a este tipo de proyectos vemos como realmente se está trabajando en todo el mundo por tener una energía nuclear sostenible y no perjudicial en cuanto a los residuos nucleares se refiere.

A raíz de la catástrofe de Fukushima, hubo un concienciamiento general acerca de la necesidad de implantar unos criterios de seguridad para evitar futuros daños, bien por el descontrol de las reacciones de fisión o bien por los efectos perjudiciales que la radiación produce sobre los seres vivos y la materia.

El problema radica debido a que las piscinas de almacenamiento de combustibles necesitaban una alimentación externa por parte de la red para su refrigeración, y esto, si se diese el caso de fallo en la alimentación, tendría unas consecuencias desastrosas, puesto que al no entrar flujo refrigerante (en el caso de estas piscinas, agua), el agua estancada elevaría su temperatura hasta el punto de su ebullición, y, por tanto, gases radiactivos entrarían en contacto con el medio ambiente.

Otro hecho que ha marcado un antes y un después en los trabajos relacionados con el combustible nuclear gastado, fueron los atentados del 11 de Septiembre de 2001 en EE.UU. A partir de estos atentados, la NRC (Nuclear Regulatory Comission) realizó un estudio sobre la situación y seguridad de sus piscinas de combustible gastado.

Los resultados de dicho estudio fueron que existen medidas de seguridad suficientes para la contención y almacenaje del combustible nuclear gastado, pero que, por otra parte, existe un riesgo de "blackout" y se

deberán desarrollar medidas para la refrigeración pasiva de las piscinas de combustible para que sean completamente seguras.

3.1 SISTEMA WESTINGHOUSE

La información aquí presentada está extractada de [1].

Westinghouse desarrolló un sistema para la refrigeración de una piscina de combustible gastado en el caso de que ocurriese un accidente o emergencia como sucedió en Fukushima. El sistema desarrollado consiste en un primer lazo de refrigeración permanente instalado dentro del edificio reactor y un lazo secundario móvil que es colocado fuera del edificio del reactor de emergencias.

En primera instancia, este sistema está diseñado para funcionar en los casos de emergencia cuando se pierde la conexión con la red que permite la refrigeración habitual, extrayendo el calor necesario. Por otra parte, este tipo de sistema permite añadir agua en la piscina para mantener los niveles requeridos. Una ventaja del sistema es que, puede trabajar en los periodos de recargas del combustible, consiguiendo mayor eficiencia y velocidad de trabajo.



Figura 3.1: Sistema de emergencia de Westinghouse



De forma paralela, Westinghouse diseñó un sistema de refrigeración pasivo basado en varios módulos flotantes, los cuales tenían cierta capacidad de disipación de calor a la atmosfera, lo que conseguía mantener la temperatura de la piscina por debajo de 60°C. El sistema está constituido por tubos fijados verticalmente a unos huecos de la basa, por lo que existe una distancia fijada entre los tubos, la cual está marcada por las rejillas espaciadoras. Una característica de este sistema es que la parte de abajo del mismo se sumerge en agua mientras que la parte de arriba está en contacto con el aire y, por tanto, experimenta una refrigeración por convección natural.

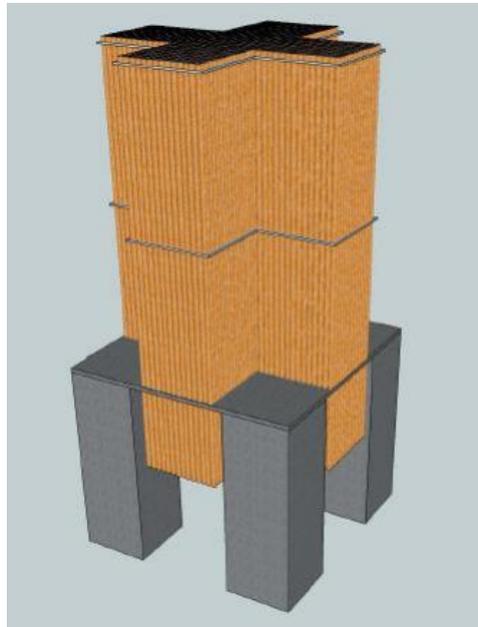


Figura 3.2: Módulo flotante

Se puede apreciar como la parte inferior (parte que llega hasta el final de los apoyos grises) estará sumergida en el agua, mientras que la parte superior del módulo será la que se encuentre dominada por convección natural externa.

3.2 SISTEMA DE SEGURIDAD PASIVO REFRIGERADO POR AIRE

La información aquí presentada está extractada de la fuente [2].

De la tesis de KTH en la que se investigaba la refrigeración de las piscinas de combustible gastado, se ha encontrado un artículo sobre dicho tema. El autor de la tesis propone un diseño de un intercambiador de calor pasivo.

El intercambiador consiste en el empleo de algún elemento que pueda sellar la piscina a la atmósfera, una pared de cobre en la piscina y unos conductos de aire. El aire, será transportado desde la parte baja del edificio del reactor, intercambiará calor, el cual será procedente de la piscina con la pared de cobre y, saldrá por la parte superior de los conductos, todo este proceso será por convección natural.

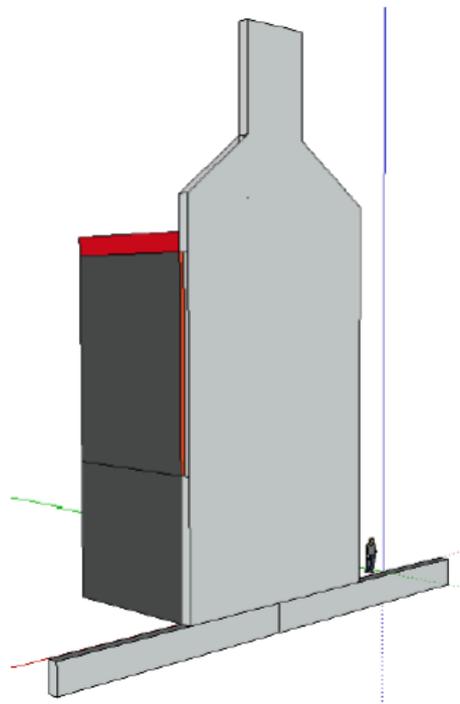


Figura 3.3: Esquema del sistema del estudio de KTH

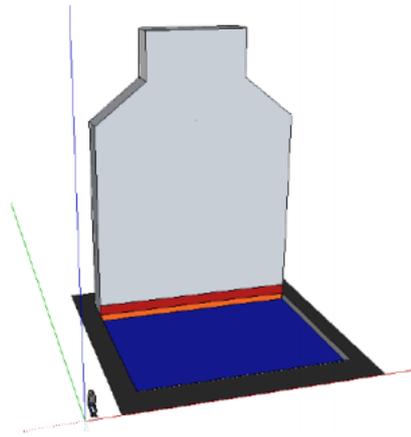


Figura 3.4: Vista del sistema del estudio de KTH

Para esta tesis, los cálculos del aire que circula por los conductos y de la energía calorífica que se disipa en el proceso, se llevaron a cabo mediante el programa OpenFoam (Open Field Operation and Manipulation). Este programa pertenece al sistema operativo C++ y tiene la funcionalidad de personalizar y extender solucionadores numéricos de problemas de mecánica de medios continuos, incluyendo la mecánica de fluidos computacional (CFD).

Una de las conclusiones que se obtuvieron de esta simulación es que el diseño no era lo suficientemente eficiente como para disipar todo el calor necesario de la piscina y, como consecuencia, acabaría entrando en ebullición la piscina. El autor concluyó (y eso nos sirve de ayuda para sacar conclusiones de cara a nuestra simulación) que el sistema pasivo de refrigeración por aire no es la mejor opción para refrigerar una piscina de combustible nuclear gastado de una central nuclear, puesto que la diferencia de temperatura entre el aire que es calentado y el aire del ambiente es muy baja para que la circulación por convección natural del aire extraiga gran cantidad de calor.

Otro defecto que se ha de tener en cuenta se refiere a la densidad y al calor específico del aire, que, como el resto de gases, tienen valores muy pequeños, lo que dificulta la extracción del calor del combustible gastado.

4. RADIATIVIDAD

En este capítulo se dan unas breves anotaciones teóricas extractadas de [3].

La amplia bibliografía sobre el tema en parte se enumera en el apartado bibliográfico.

La radiactividad consiste en la emisión espontánea de partículas alfa, beta o radiaciones gamma por desintegración de núcleos inestables que se vuelven más estables.

La desintegración responde al esquema:



Donde **X**, representa el núcleo original, **Y** es un núcleo algo menos pesado, **A** es un núcleo muy ligero o una partícula elemental y **Q** la energía de desintegración que se libera.

La energía que se libera puede ser en forma de:

- Energía cinética.
- Radiación electromagnética.

Se hace la observación de que cuando un núcleo radiactivo decae el núcleo derivado suele ser inestable, por lo cual también se desintegrará de forma sucesiva hasta que alcance una configuración estable.

La desintegración radiactiva cumple los principios de:

- 1º. Conservación de la carga eléctrica. La carga eléctrica del núcleo antes del proceso de desintegración es igual a la carga del conjunto tras la misma.
- 2º. Conservación del número másico. No hay un cambio en el número de nucleones.
- 3º. Conservación de la masa y energía.



4º. Conservación de la cantidad de movimiento. La energía cinética neta es igual antes y después de la reacción.

4.1 TIPOS DE RADIACIÓN

4.1.1 RADIACIÓN Y DESINTEGRACIÓN ALFA

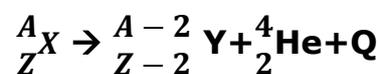
Está constituida por núcleos de Helio formados por dos protones y dos neutrones, los cuales son muy estables. Tienen por lo tanto carga positiva y a su paso a través de la materia producen ionizaciones.

La capacidad de penetración es muy reducida, no siendo capaz de atravesar la piel y salvo por inhalación o penetración accidental no se considera peligrosas.

La desintegración alfa se produce generalmente en núcleos pesados (son núcleos demasiado grandes para ser estables) y consiste en la emisión de un núcleo de helio-4 (partícula alfa), el cual está formado por dos protones y dos neutrones. Por esta razón, el núcleo hijo que se produce tiene dos protones y dos neutrones menos que el padre, es decir, el núcleo hijo tiene cuatro unidades menos de número másico A y dos unidades menos de número atómico Z.

Así, el núcleo hijo corresponderá a un elemento situado en la tabla periódica dos lugares antes que el núcleo padre.

Al igual que para el esquema general de la desintegración, la desintegración alfa cumple dicha relación en la forma:



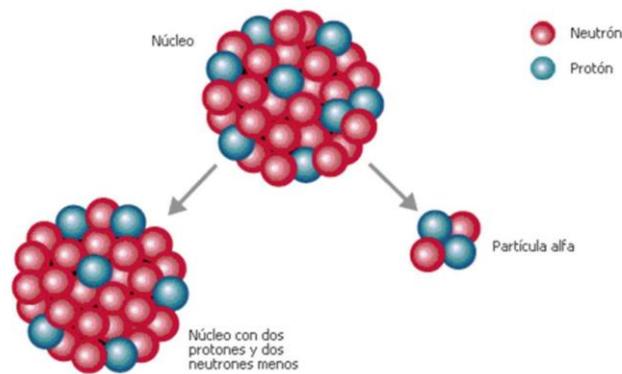


Figura 4.1: Desintegración alfa

"Q" representa la energía (como se ha comentado en el punto anterior) que se libera una vez se produce la desintegración, y corresponde básicamente, a la energía cinética con la que sale expulsado el núcleo de helio, el cual siempre se emite con energías cinéticas definidas, que como regla general cumple la siguiente expresión:

$$Q = (M_x - M_y - M_\alpha) \cdot C^2,$$

Donde tenemos que:

M_x es la masa del núcleo padre.

M_y es la masa del núcleo hijo.

M_α es la masa de la partícula alfa.

C^2 es la velocidad de la luz al cuadrado y tiene un valor de 931,494 MeV/u.m.a.

Esta energía de desintegración Q aparece básicamente en forma de energía cinética, donde la mayor parte se asocia al núcleo de helio ($\approx 98\%$), debido a los principios de conservación de la cantidad de movimiento y puesto que la masa del helio es mucho menor que la del núcleo hijo.

Un ejemplo típico de este tipo de desintegración es el decaimiento del torio-232 ($Z=90$) el cual se convierte en radio-228 y energía. Es un caso

especial puesto que, tras la primera desintegración, el núcleo hijo ya es un núcleo estable y aparece en su estado fundamental, por lo que no emite rayos gamma.

4.1.2. RADIACIÓN Y DESINTEGRACIÓN BETA

Están formados por electrones que proceden del núcleo atómico, no de los orbitales. La reacción que tiene lugar en este tipo de proceso es la conversión de un neutrón en un protón y un electrón.

Tienen menos energía cinética que las partículas α porque aun teniendo una gran velocidad tiene muy poca masa, pero sí mayor poder de penetración.

En este tipo de desintegración, el número másico permanece constante mientras que el número atómico cambia en una unidad. Existen tres tipos de desintegración beta: Beta menos (β^-), beta más (β^+), y captura electrónica.

En la desintegración Beta menos (β^-), se tiene la emisión de un electrón emitido por un núcleo.¹

Este tipo de desintegración se da debido a la transformación de un neutrón del núcleo en un protón, un electrón y un antineutrino (antipartícula del neutrino). El protón permanece en el núcleo mientras que el electrón y el antineutrino son expulsados del núcleo. Se mantiene por tanto el número másico A y aumenta en una unidad el número

¹ **NOTA:** ¿Cómo es esto posible si los electrones no se encuentran en el núcleo sino en la corteza? Pues bien, además de los ya conocidos electrón, protón y neutrón existen otras partículas elementales que, aunque no formen parte de la materia ordinaria, aparecen y desaparecen en algunas reacciones que solamente se dan bajo ciertas condiciones.

Toda partícula tiene una antipartícula y en el caso del electrón, existe una partícula de misma masa, momento spín y carga (dicha carga es positiva), esta partícula es el positrón. De este modo se explica la aparición de electrones en el núcleo de forma momentánea, pues una de las propiedades de los pares partícula-antipartícula es que pueden crearse a partir de fotones.

atómico Z . Como dato decir que el nuevo elemento se encontrará en un lugar posterior al original en el sistema periódico.

Este decaimiento beta menos suele producirse en núcleos que tienen una relación N/Z demasiado grande como para ser núcleos estables, como por ejemplo es el carbono-14.

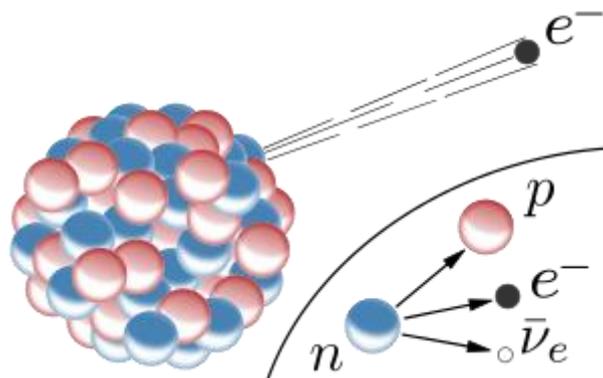


Figura 4.2: Desintegración Beta menos, (β^-).

En cuanto a la desintegración Beta más (β^+), se produce la emisión de un positrón desde el núcleo, en esta ocasión, se produce la desintegración de un protón en un neutrón, un positrón y un neutrino.

El decaimiento β^+ se suele producir en núcleos en los que la relación N/Z es demasiado pequeña para que se dé estabilidad y siempre que la masa del núcleo padre sea al menos dos masas de electrón mayor que la del núcleo hijo.²

² **Nota:** La desintegración β^+ no se puede dar para un protón aislado, pues no cumpliría el principio de conservación de masa-energía, sin embargo, sí que se es posible en el interior de un núcleo debido a la energía de enlace global del mismo.

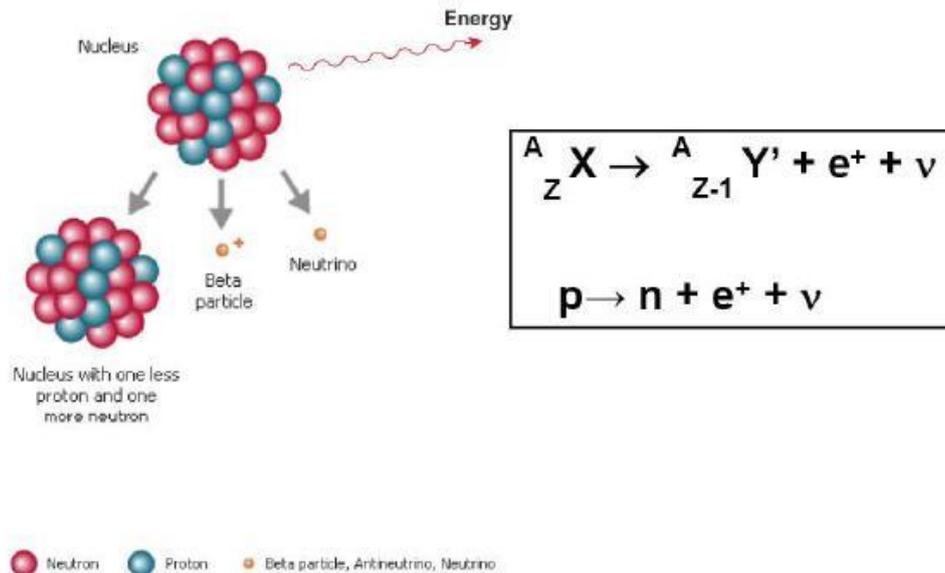


Figura 4.3: Desintegración Beta más, (β^+).

Por último, en cuanto a las desintegraciones beta se refiere, hablaremos de la captura electrónica (o captura K), la cual también es un tipo de desintegración beta, en la que un electrón es atrapado por el núcleo, y se da, sobre todo, en átomos pesados, en los que el orbital de menor energía (1s) está muy próximo al núcleo.

En este caso, el electrón capturado se combina con un protón del núcleo para formar un neutrón y un neutrino el cual es emitido.

El hueco dejado por el electrón capturado es ocupado por otro electrón exterior, el cual, en el proceso de transición hacia su estado fundamental, emitirá un fotón de energía (rayos x).

En este tipo de desintegración, se mantiene el mismo número másico A, pero, por otra parte, el número atómico Z disminuye en una unidad, es decir, el número de neutrones aumenta en una unidad. A continuación, se representa dicho proceso en las figuras 4.4 y 4.5

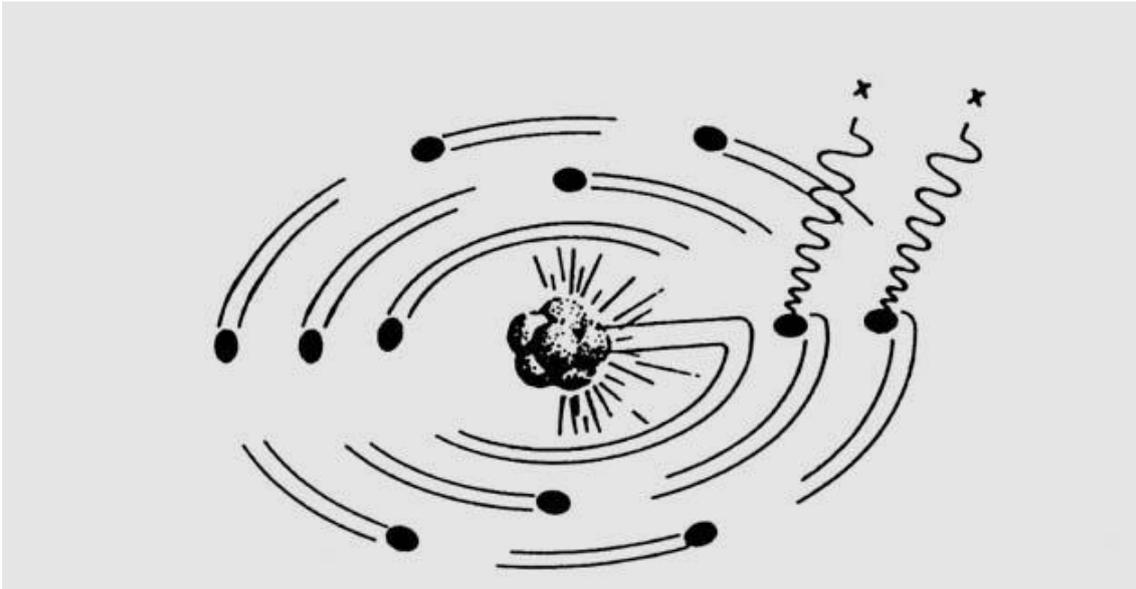


Figura 4.4: Representación del proceso de captura electrónica.



Figura 4.5: Emisión de rayos X por caída de electrón orbital interno

4.1.3. RADIACIÓN GAMMA

Están constituidas por fotones de energía muy alta, no poseyendo por lo tanto ni carga ni masa.

Son las más penetrantes de las tres, atravesando fácilmente la piel y pueden producir daños y modificaciones en el ADN. Esto mismo permite su uso en tratamientos de cánceres.

5. TRANSFERENCIA DE CALOR

La información aquí expuesta se ha extractado de la fuente [4].

La transferencia de calor es un fenómeno físico estudiado por el campo de la termodinámica. El calor es energía en tránsito siempre y cuando exista una diferencia (gradiente) de temperatura dentro de un mismo sistema o bien, cuando se ponen en contacto dos sistemas a diferente temperatura, entre ellos se transfiere energía.

La Termodinámica, basándose en los estados de cada sistema desde un punto de vista macroscópico, es decir, en función de atributos tales como la presión, la temperatura y el volumen, que se pueden medir, determina si ha habido cambios en la energía interna de los mismos. En cumplimiento del Primer principio y descartada la interacción de trabajo con el exterior, la variación de energía interna solo puede ser debida a calor, es decir, a transferencia de energía de un sistema al otro.

El problema de estos parámetros macroscópicos es que suele son medibles si el sistema se encuentra en estado de equilibrio. Por eso, la termodinámica sólo se ocupa de sistemas en estado equilibrio. En función de las diferencias entre dos estados de equilibrio diferentes, determina la energía transferida de un estado al otro, sin tener en cuenta la velocidad a la que este se produce. Una vez queremos entrar a valorar el tiempo en el que tiene lugar la transferencia de energía ya entramos en la rama de la termodinámica como es la transferencia de calor.



Los tres métodos de transferencia de calor, los cuales se pueden producir tanto de manera simultánea como de forma individual son:

- Transferencia de calor por conducción
- Transferencia de calor por convección
- Transferencia de calor por radiación

En cuanto a nuestro proyecto se refiere, solamente necesitamos trabajar con los dos primeros, pues la radiación se considera despreciable (aunque realmente exista) puesto que es una simplificación importante del proyecto y nos afecta de forma mínima.

5.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

Cuando en un medio sólido existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. El calor transmitido por conducción por unidad de tiempo q_k es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx multiplicado por el área A través del cual se transfiere, es decir

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx}$$

Figura 5.1: Expresión de la transferencia de calor por conducción

T: temperatura; x: dirección del flujo de calor

El flujo de calor depende de la conductividad térmica k que es la propiedad física del medio [W/m K], luego se tiene

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ley de conducción de Calor de Fourier}$$

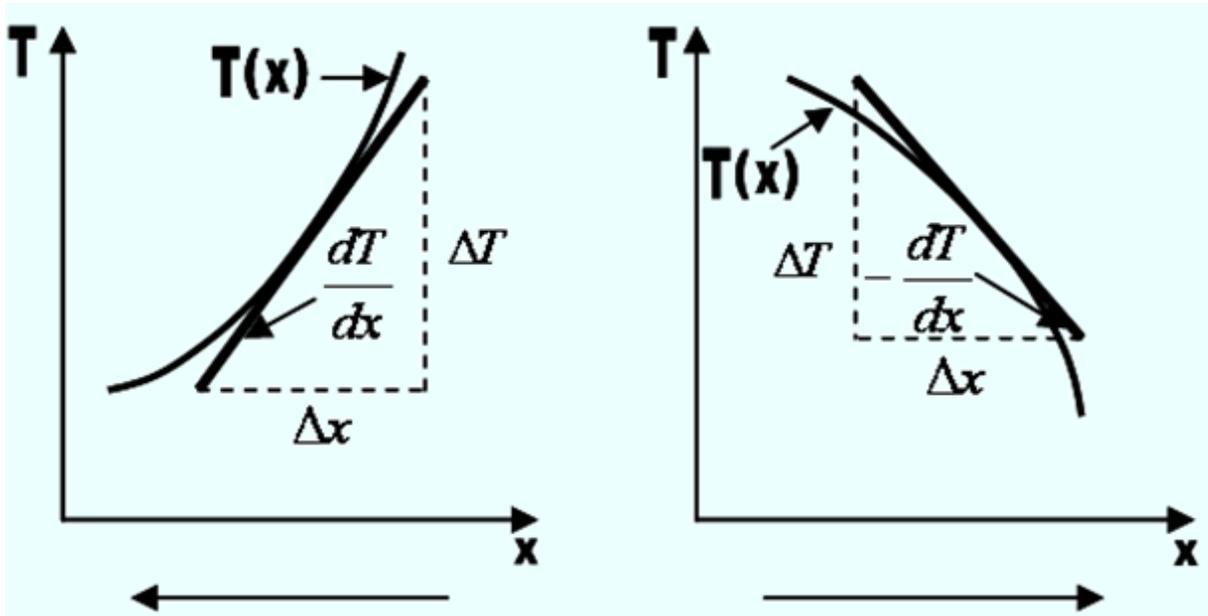
Ecuación 5.2: Ley de conducción de calor de Fourier

En cuanto a los convenios del signo y la dirección del flujo térmico, en la figura 5.3 vemos como, cuando el flujo térmico se mueve en el sentido



positivo del eje de abscisas, la tangente tiene pendiente negativa y, por tanto, signo negativo en la parcial de la temperatura respecto de la distancia. El caso contrario se da cuando nos movemos en el sentido opuesto del eje de abscisas.

Convenios del signo



Dirección del flujo térmico

Dirección del flujo térmico

Figura 5.3: Gráfica que muestra la recta tangente a la curva que sigue la ley de conducción de calor de Fourier.

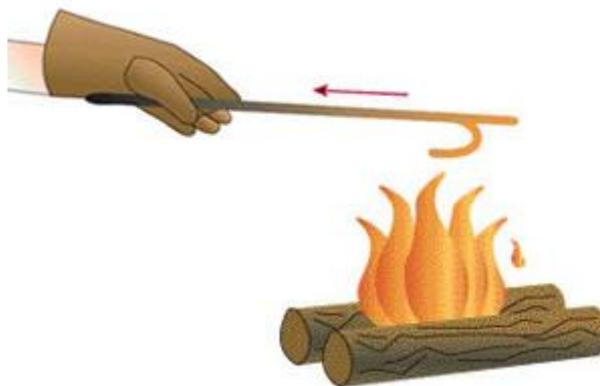


Figura 5.4: Transferencia de calor por conducción desde el hierro a la mano.

5.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección ocurre cuando se ponen en contacto un fluido y una superficie sólida a diferente temperatura, dicho proceso es el denominado convección, pueden existir dos procesos de convección: convección libre o natural y convección forzada.

La convección natural se da cuando la fuente de convección procede de la diferencia de densidad en el fluido que resulta del contacto con una superficie a diferente temperatura y ocurren fuerzas ascensionales.

En el caso de la convección forzada se tiene una fuerza motriz exterior, la cual mueve un fluido sobre una superficie a mayor o menor temperatura que la del fluido. Independientemente de la forma de convección, la cantidad de calor intercambiada se rige por la siguiente Ley de Newton del enfriamiento:

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty})$$

Ecuación 5.5: Ley de transferencia de calor por convección

Donde:

h_c Conductancia convectiva térmica unitaria o coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfase líquido-sólido.

A-Área superficial en contacto con el fluido en m^2

T_s -Temperatura de la superficie, K

$T_{f,\infty}$ -Temperatura del fluido no perturbado lejos de la superficie transmisora del calor



El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de la densidad, viscosidad y velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico). La resistencia térmica en la transferencia de calor por convección viene dada por

$$\bar{R}_c = \frac{1}{h_c A}$$

Ecuación 5.6: Expresión resistencia térmica convectiva



Figura 5.7: Transferencia de calor por convección del agua del interior del recipiente.

6. MECÁNICA DE FLUIDOS

La información que aquí presentamos ha sido extraída de [5].

La mecánica de fluidos es la rama de la física que estudia el comportamiento y movimiento tanto de gases como de líquidos, estudia desde la interacción entre dos o más fluidos, hasta la interacción de un fluido con el entorno que lo rodea.

Los fluidos tienen una característica principal y es que no pueden resistir esfuerzos de tipo cortante, y por eso, se deforman fácilmente y no adquieren una posición o forma fija.

6.1 PROPIEDADES DE LOS FLUÍDOS

Las propiedades de cada fluido son importantes en la elección del fluido apropiado, pues en función del fluido elegido, obtendremos eficacia o no en nuestro objetivo, y mayor o menor eficiencia. Los fluidos, al igual que los materiales de los que está compuesto el proyecto, son elementos que pueden ahorrar importantes cantidades de dinero. A continuación, se listan las propiedades más importantes a tener en cuenta:

- Densidad: Se define como la cantidad de masa por unidad de volumen y su unidad en el Sistema Internacional es el kg/m^3 .
 $\rho = \text{masa/volumen}$

Los gases son menos densos que los líquidos y su densidad se puede modificar cambiando la presión o temperatura del interior del recipiente que lo contiene. Por su parte, los líquidos apenas varían su densidad, y solamente se altera mediante cambios de temperatura.

Una utilidad en la variación de la densidad en los líquidos es el impedir que dos líquidos se mezclen, ya que, al tener diferentes densidades, flotaría un líquido sobre otro, como ocurre entre el agua y el aceite.



- Presión: La presión en un fluido se define como la fuerza que se ejerce sobre dicho fluido por unidad de superficie. Se utiliza el manómetro para su medición. La unidad de presión en el Sistema Internacional es el pascal y equivale a 1 newton por metro cuadrado.

$$\text{Presión (p)} = \text{Fuerza (F)} / \text{Superficie (S)}$$

En el caso de los gases, las fuerzas presionan con la misma intensidad todos los puntos del recipiente que los contiene. Debido a la baja densidad de los gases, la presión de forma natural es baja, aunque aumenta al comprimirlos.

En el caso de los líquidos, la presión aumenta con la profundidad, a causa del peso (fuerza) que tiene el punto de referencia por encima de él. En el caso de un líquido dentro de un recipiente, una presión aplicada en un punto se transmite con la misma magnitud a todos los puntos del recipiente, es el principio de Pascal.

- Viscosidad: Esta propiedad es la que determina la fluidez del líquido a determinadas temperatura, es decir, la facilidad de desplazamiento que tiene cada líquido, a mayor viscosidad, peor fluidez. Como ocurre con otras propiedades, depende de la temperatura, cuanto mayor sea la temperatura, menos viscoso es el fluido, menos resistencia a fluir ofrece.



6.2 FLUJO LAMINAR

La información expuesta a continuación ha sido extractada de [6].

En el flujo en régimen laminar, la estructura se caracteriza por tener un movimiento en capas o de láminas. En este tipo de flujo, no existe un estado macroscópico de las capas de fluido adyacentes entre sí. Un filamento delgado de tinta que se inyecte en un flujo laminar aparecería como una sola línea, sin ningún tipo de desviación de dicha tinta a través del fluido, excepto una difusión muy lenta debido al movimiento molecular.

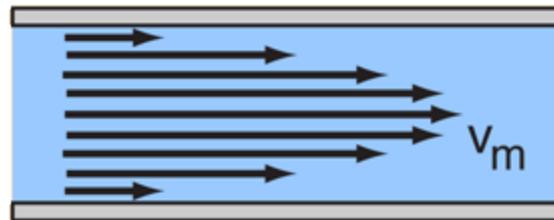


Figura 6.1: Campo de velocidades en régimen laminar

Un flujo será laminar o no en función de las propiedades que se den en cada caso, no siempre un fluido va a tener un régimen laminar o al revés. Los parámetros de los que depende el régimen del fluido son:

- La densidad del fluido
- La velocidad promedio del fluido
- El diámetro del tubo por donde vaya el fluido
- La viscosidad del fluido

Estos parámetros se engloban en una fórmula que se llama número de Reynolds y es indicativa del régimen en el que se encuentra un fluido cualquiera.

La cantidad de almacenamiento en España se extiende hasta los 12.000 m³ de materiales, de los cuales, la mayoría es combustible gastado (sobre 20.000 elementos) mientras que la cantidad de residuos vitrificados y residuos especiales apenas se elevan a menos de 70 cápsulas de cada uno.

El ATC almacenará los materiales en seco y aislando unas partes del proceso de otras mediante unas barreras múltiples, las cuales garantizan el confinamiento. Además, tiene la ventaja de ser una instalación reversible, es decir, podremos recuperar el combustible gastado y los residuos de alta actividad una vez haya finalizado su vida operativa para su posterior gestión, lo que da independencia a cada etapa del proceso de gestión.

Los ATC se sirven de dos formas para gestionar y tratar el combustible gastado proveniente de las centrales nucleares, bien lo hacen en piscinas o bien se hace en sistemas complementarios de almacenamiento en seco (contenedores). Al centralizar dicho combustible en estos dos tipos de sistemas se tienen diversas ventajas como es la seguridad y vigilancia y permite actuar y optimizar las labores a realizar sobre el material a manejar.

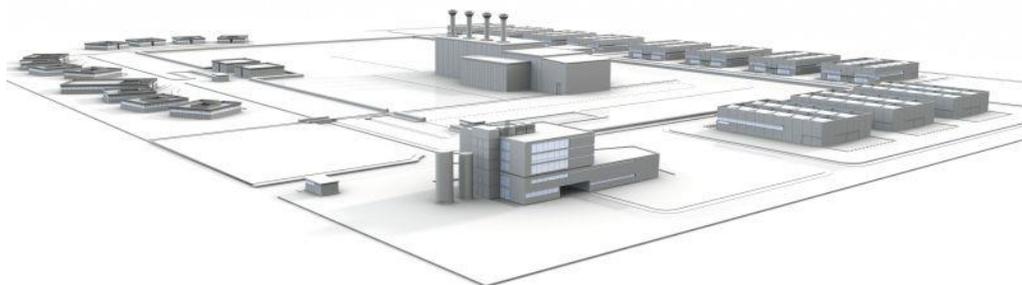


Figura 7.2: Esquema de la disposición del recinto del ATC de Villar de Cañas.



7.1.1 PARTES DEL ATC

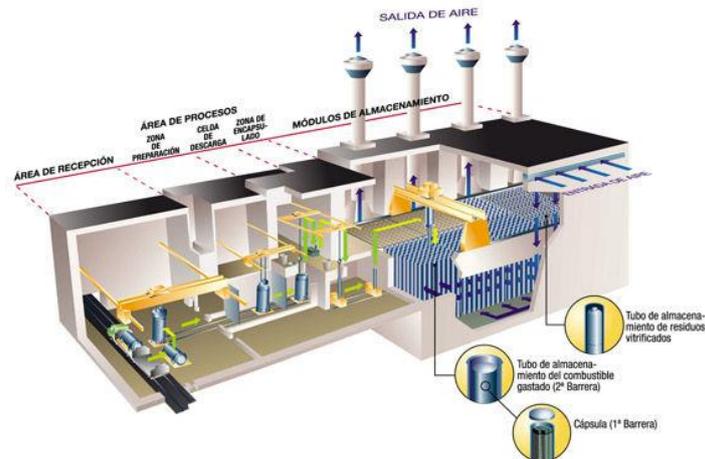


Figura 7.3: Parte del ATC, destaca el módulo de almacenamiento. Fuente: Enresa

Edificio de recepción:

Es el lugar donde se reciben camiones y demás vehículos que portan los contenedores de combustible gastado, residuos especiales y cápsulas de residuos vitrificados.

Edificio de procesos:

En este edificio se van a realizar los procesos de preparación de contenedores, como es la comprobación de estos y la retirada de las tapas, en dos líneas independientes, una para el combustible gastado y otra para las cápsulas de residuos vitrificados. A su vez, por otro parte también se acometen en este edificio las funciones de descarga de los contenedores, de almacenamiento transitorio de elementos combustibles y del encapsulado del combustible gastado en la celda caliente, así como de su recuperación.

Bóvedas de almacenamiento:

Estos compartimentos son el lugar donde se va a almacenar el combustible gastado y las cápsulas de residuos vitrificados en tubos de almacenamiento.

Estos tubos de almacenamiento necesitan ser contruidos de materiales resistentes a condiciones adversas, por eso son de acero inoxidable y en ellos se depositarán las cápsulas con el material radiactivo.

De este modo se crea una doble capa de confinamiento y por tanto mayor seguridad, la primera capa la crea la propia cápsula y la segunda, la crea el tubo de almacenamiento.

Por otra parte, las bóvedas de almacenamiento también se encuentran contruidas por un material muy resistente al paso de la radiación., como es un hormigón de gran espesos que permite obtener un buen aislamiento con el medio exterior.

Estas bóvedas, por otra parte, tienen que tener orificios de entrada y salida de aire para la refrigeración de los tubos donde se encuentra el encapsulado a tratar.

Estos orificios son independientes unos de otros y dicha refrigeración es por convección natural, es decir, el aire se introduce por los orificios, circula a través de los tubos (los cuales están a una temperatura muy elevada) y los enfrían. Por último, el aire caliente se expulsa al ambiente a través de las chimeneas de ventilación, hay una por bóveda situadas a una altura de unos 45 m situados sobre hormigón armado.

Módulo de almacenamiento de residuos especiales:

Este módulo está formado por cuatro almacenes independientes entre sí y algunas estructuras contiguas auxiliares, destinados al almacenamiento de los residuos especiales:

- Almacén de fuentes
- Almacén de reserva
- Almacén de residuos Operacionales
- Almacén de fosos



Almacén de Espera de contenedores:

Su misión es albergar en espacios de periodo transitorios, contenedores para transporte y/o almacenamiento de combustible gastado y cápsulas de vitrificados y de residuos especiales previo a enviarlos al área de proceso. Este almacén permite al ATC tener una mayor flexibilidad en el almacenamiento de material y mayor flujo de entrada de residuos, pues tiene más margen de maniobra.

Taller de mantenimiento de contenedores:

Como su nombre indica, es un lugar indicado para el mantenimiento de contenedores de transporte, tanto externo como interno.

Laboratorio de combustible gastado y residuos radiactivos:

Este edificio no forma parte de la instalación propia del ATC, sino del edificio del Centro Tecnológico Asociado, aunque debido a su carácter nuclear, está situado dentro del área protegida.

Por último, cabe apuntar que dentro del área protegida existen unos departamentos y edificios que no se encuentran en el mismo edificio del material combustible gastado, pero donde se desarrollan otras labores y gestiones relacionadas con ellos y por tanto se encuentra en vigilancia, son las denominadas instalaciones de apoyo.

7.1.2 CENTRO TECNOLÓGICO ASOCIADO

El Centro Tecnológico Asociado es una instalación complementaria al ATC en la que se encuentran laboratorios donde se realizan experimentos, proyectos y programas de cara a mejorar en cuanto a la gestión y tratamiento del combustible gastado se refiere.

Los cuatro laboratorios de los que hablaremos son:

- Laboratorio de caracterización de procesos y medio ambiente:



En este laboratorio se intenta ensayar y disponer de capacidad analíticas propias con materiales “no activos” y así desarrollar ensayos específicos con el comportamiento químico de los sistemas y materiales de confinamiento, así como de los procesos de migración y dispersión ambiental.

Tendrán mucha importancia las tecnologías y métodos relacionadas con la vigilancia y la monitorización ambiental, en todo su contexto.

- Laboratorio de materiales:

En este laboratorio se realizan los trabajos de investigación y los ensayos asociados a distintos materiales de base metálica, cemento y arcilla, como a elementos que su función consiste en el aislamiento en las instalaciones del almacenamiento de residuos radiactivos.

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE GASTADO

El combustible nuclear tiene una vida útil de entre aproximadamente 3-4 años de duración. Posteriormente deberá pasar por los diferentes tratamientos para su retirada final tras varios años de desmantelamiento. Se considera que el combustible nuclear está gastado cuando los productos de la fisión y la medida en la que el U-235 va decreciendo hace que la reacción de cadena no sea viable y, por tanto, tienda a pararse. En ese momento se retira el combustible y se reemplaza por otro diferente.

El combustible gastado (o irradiado) presenta dos problemas principales como son el calor y la radiación que desprende, esta última perjudicial para la salud humana y, por tanto, es necesario su procesado.

Por un lado, el calor es tratable en periodos cortos de plazo puesto que el combustible sufre un enfriamiento rápido una vez se desintegran los radionucleidos que lo producen, es en ese momento cuando el combustible está listo para el transporte o el respectivo tratamiento.



El principal problema viene con la radiación (especialmente la radiación gamma), la cual, tiene muy alto poder energético y es altamente penetrante. Esta radiación tiene periodos de semidesintegración de aproximadamente 30 años, aunque no es igual de nociva durante todo el tiempo, pues en los primeros compases del tratamiento resulta tener el mayor efecto dañino.

A la vez que la radiación gamma, se encuentra la radiación alfa, la cual tiene periodos de desintegración de cientos e incluso miles de años, aunque esta radiación sea bastante menos nociva para la salud humana, es mucho más duradera.

Es decir, debido a las características del combustible gastado, primero debe haber una etapa corta de enfriamiento, una más larga para la protección contra la radiación gamma y por último, una etapa muy larga para la protección contra los rayos alfa, en esta etapa no hará falta usar un blindaje, simplemente un confinamiento hermético (pues las partículas alfa tienen un poder penetración muy pequeño, de unos milímetros).

7.2.1 RADIOTOXICIDAD DE LOS RESIDUOS RADIÁCTIVOS DE PERIODO LARGO

Como se ha comentado en el punto anterior, los periodos de semidesintegración son diferentes en función del tipo de partícula. En este caso, hablaremos de aquellas que presentan mayor periodo de desintegración, las partículas alfa.

El principal peligro a evitar con estas partículas no es la radiación directa, sino, evitar que lleguen a la atmosfera puesto que podrían ser ingeridas, inhaladas o incorporadas de otra manera a los seres vivos.

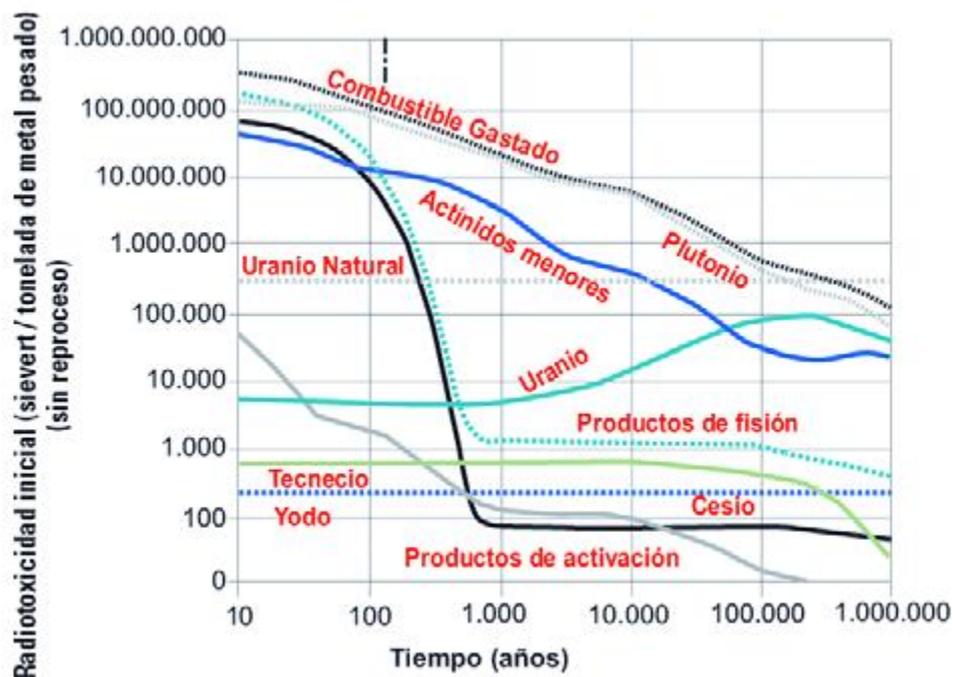


Figura 7.4: Evolución del material radiactivo en el tiempo. Fuente: CEA

En la gráfica se ve la evolución de diferentes materiales radiactivos en cuanto a sus semidesintegraciones se refiere. Se ve, por ejemplo, que el Uranio (U-235) se mantiene prácticamente estable durante miles de años y, por tanto, su proceso es muy lento. Otros, en cambio, como los productos de la fisión, inicialmente tienen un alto poder radiactivo (de ahí la necesidad de un cuidado inicial intenso) pero decaen rápidamente tras varias décadas.

Actualmente, se cuenta con tecnología suficiente para disponer de los residuos de manera eficaz, sin reprocesos, durante al menos 300.000 años.

7.3 CICLOS DE GESTIÓN

7.3.1 CICLO ABIERTO

El ciclo abierto se dice de aquel en el cual se ha considerado el combustible gastado como residuo radiactivo de alta actividad. Cuando dicho combustible se extrae del reactor nuclear, se requiere de un almacenamiento previo en las piscinas de las centrales nucleares, una vez se ha tratado y dejado el suficiente tiempo, este combustible se traslada a un almacenamiento temporal centralizado (ATC) hasta que finalmente recalca en el almacén definitivo, el AGP (Almacén Geológico Profundo).

7.3.2 CICLO CERRADO

El ciclo cerrado, por otro lado, tiene por objetivo reutilizar parcialmente el combustible gastado a través del reprocesado. De esta manera se recupera el uranio y parte del plutonio que todavía se tiene con potencial energético. Es así como se "cierra" el ciclo del combustible. Los demás componentes desechables se almacenan temporalmente a la espera de que sean almacenados definitivamente al igual que en el ciclo abierto.



Figura 7.5: Se observa la combinación del ciclo cerrado y el ciclo abierto, una vez pasa el combustible gastado al ATC. Fuente: Enusa

8. MODELO DE SIMULACIÓN

8.1 INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo nuestra simulación, se han realizado una serie de simplificaciones y suposiciones, las cuales nos ayudan a hacer más fácil la visualización del proyecto, por lo que debemos valorar los resultados para verificar que el error que en ellos existe sea lo suficientemente pequeño para poder despreciarlo.

En este apartado vamos a empezar hablando sobre la resolución de este tipo de proyectos con el sistema de elementos finitos. Posteriormente, explicaremos el funcionamiento del programa que hemos utilizado, es decir, se describirá paso a paso la realización del proyecto en el programa COMSOL MULTIPHYSICS y, por último, explicaremos de forma más específica los pasos aplicados a nuestra simulación.

8.2 ELEMENTOS FINITOS (MEF)

La información que exponemos a continuación está extracta de [8].

El sistema de resolución mediante elementos finitos (MEF) es un método utilizado en los procesos industriales para predecir el comportamiento del proyecto que se va a realizar, la reacción de dicho proyecto ante fuerzas, vibraciones, flujo de líquidos, calor y demás condicionantes que pueden aparecer en la naturaleza. Gracias a este tipo de análisis podemos analizar de antemano y sin realizar ningún trabajo manual, si nuestro producto cumplirá los requisitos estimados.

El método de elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de "Elementos" o partes, cuyo comportamiento es especificado mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados



“nodos”. Dichos nodos son los puntos de unión de cada elemento con los adyacentes.

- La solución del sistema completo se hace de la misma forma que los problemas discretos, por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

En resumen, el MEF consiste en transformar un sistema continuo en un modelo discreto de forma que su resolución (aproximada) sea más simple que la del modelo original.

Esto se visualiza a continuación en la figura 8.1

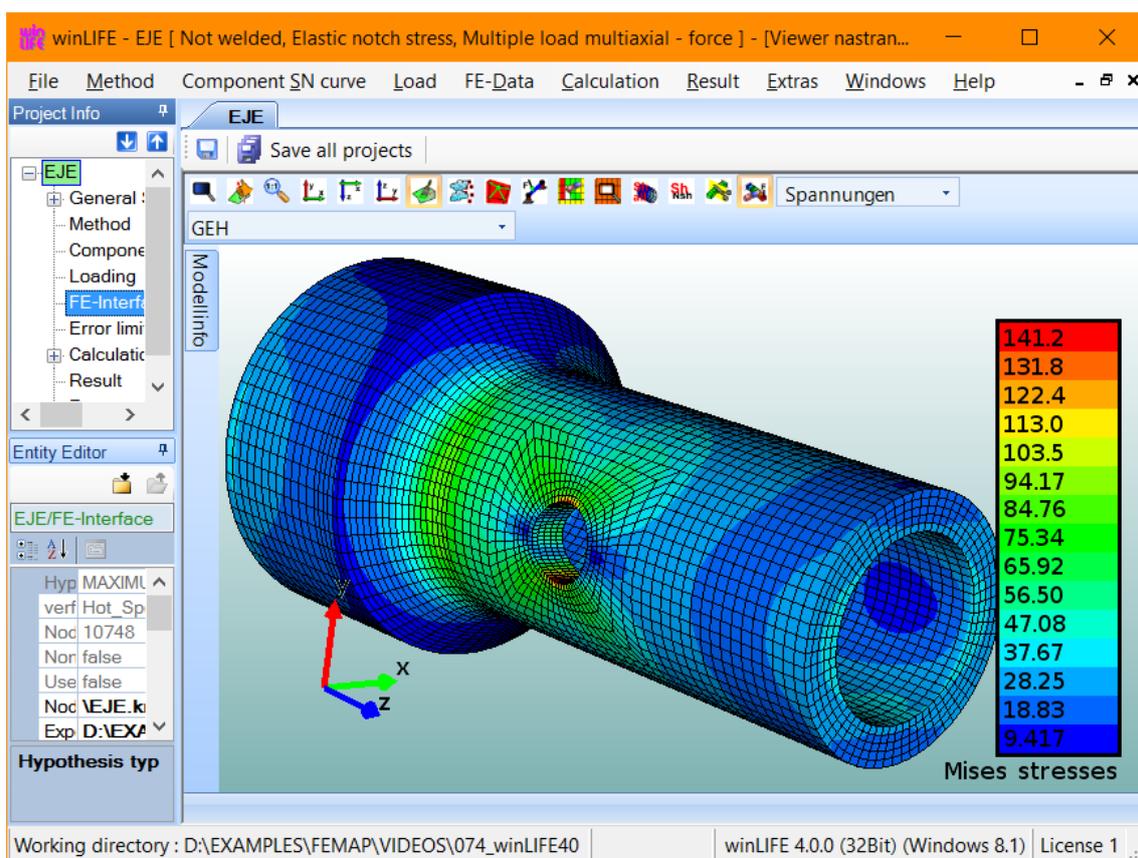


Figura 8.1: Simulación de la temperatura de un pistón mediante elementos finitos.

8.3 COMSOL MULTIPHYSICS

El programa elegido para realizar los cálculos y aplicar el mallado necesario es Comsol Multiphysics versión 5.2a. Se trata de un programa especializado en los campos de ingeniería, física y matemática aplicada. Otros programas equivalentes a este simulador son Catia, Cosmos, SolidWorks. Estos programas, junto con Comsol, son utilizados para pre análisis con el objetivo de llegar a una serie de resultados que verificarán o no las suposiciones e ideas iniciales con la posterior construcción y diseño de un prototipo. De esta manera el prototipo será mucho más exacto de forma inicial, ya que los datos de partida son más fiables gracias a esta resolución numérica.

El programa Comsol nos permite trabajar con una geometría creada desde cero en el mismo programa (a través de herramientas de CAD) o importada desde ficheros externos. A esta geometría se añadirán las condiciones de contorno pertinentes y las ecuaciones (físicas) que necesitamos en cada geometría. Aplicando un mallado a la estructura procederemos a la simulación (resolución de las ecuaciones).

Comsol nos permite realizar estas acciones a través de una interfaz simple e intuitiva. Además se podrá trabajar en modelos multidimensional según convenga (1D, 2D, 3D...) e insertar gran variedad de físicas a los modelos, siendo posible el acoplamiento de estas cuando sea necesario.

La generación automática y adaptativa del mallado y la biblioteca de materiales permiten una maniobrabilidad sobre los cálculos muy extensa.

Entre las físicas disponibles para su aplicación a la geometría nos encontramos:

- Mecánica de estructuras.
- Modelización de componentes.
- Matemática aplicada.



- Física, mecánica cuántica.
- Reacciones químicas, transferencia de calor, mecánica de fluidos.
- Electromagnetismo.

El programa COMSOL sigue el mismo patrón de trabajo para cualquier física con la que se quiera trabajar. Los pasos a seguir son los siguientes:

1º- Se define la geometría del proyecto en cuestión, definiendo tanto las dimensiones físicas como la disposición en el espacio.

2º- Se definen los materiales de los que está compuesta la geometría definida, todos ellos vienen predefinidos por el programa y en función del material que sea (aire, aluminio...) se deben definir ciertos parámetros variables como puede ser la viscosidad dinámica o la conductividad térmica.

3º- Se crean las condiciones de contorno del problema, es decir, definir las condiciones que van a entrar en juego dentro de las físicas que hemos de utilizar.

4º- Se crea el mallado del proyecto, esto es, el proceso de división mediante elementos finitos en cuestión.

5º- Se realiza el estudio del caso a simular, con sus cálculos pertinentes por parte del programa, ajustando nuestro "Solver".

6º- Se obtienen gráficas y resultados de los parámetros a estudiar para sus posteriores conclusiones.

8.3.1 PANTALLAS INICIALES

En este apartado se van a describir los pasos previos a la iniciación de la simulación. El programa COMSOL, se inicia con una pantalla en la cual se nos da la opción de seleccionar si queremos trabajar con un modelo completamente en blanco o un asistente de modelo, elegiremos este último.



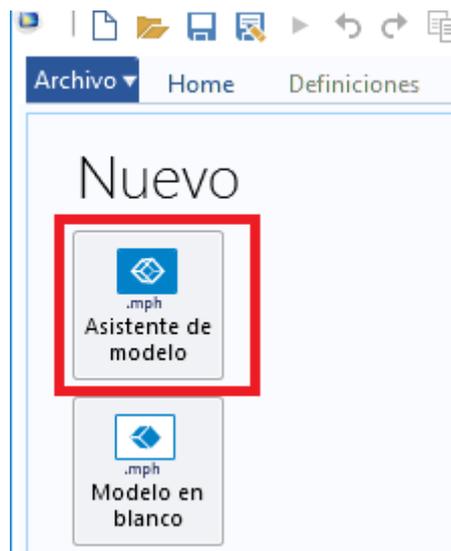


Figura 8.2: Pantalla asistente de modelo

A continuación, se nos pide seleccionar la dimensión con la cual queremos trabajar, es decir, en una, dos o tres dimensiones. Nosotros, queremos trabajar en 3D y por tanto seleccionaremos esa opción.

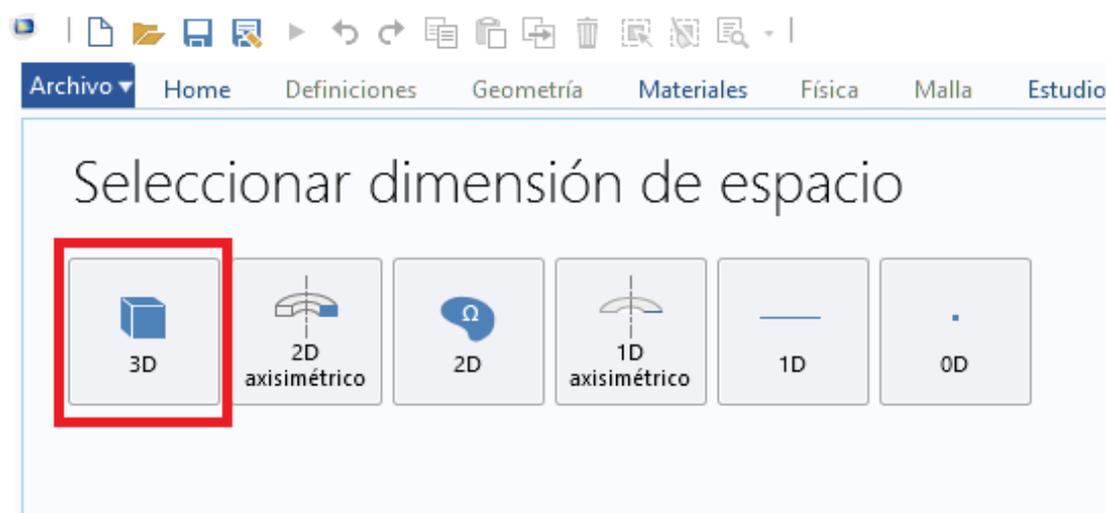


Figura 8.3: Pantalla elección de dimensiones

Lo siguiente que se nos pide es seleccionar las físicas que van a entrar en juego en nuestra simulación, tenemos una amplia variedad, aunque en nuestro caso (y por simplificación de la simulación dentro de unos límites) solamente vamos a mezclar dos físicas como son la transferencia de calor y la mecánica de fluidos en régimen laminar. COMSOL nos da una opción

para ensamblar dichas físicas como si de una sola se tratase, esta es la opción transferencia de calor conjugado y es la opción que elegiremos.

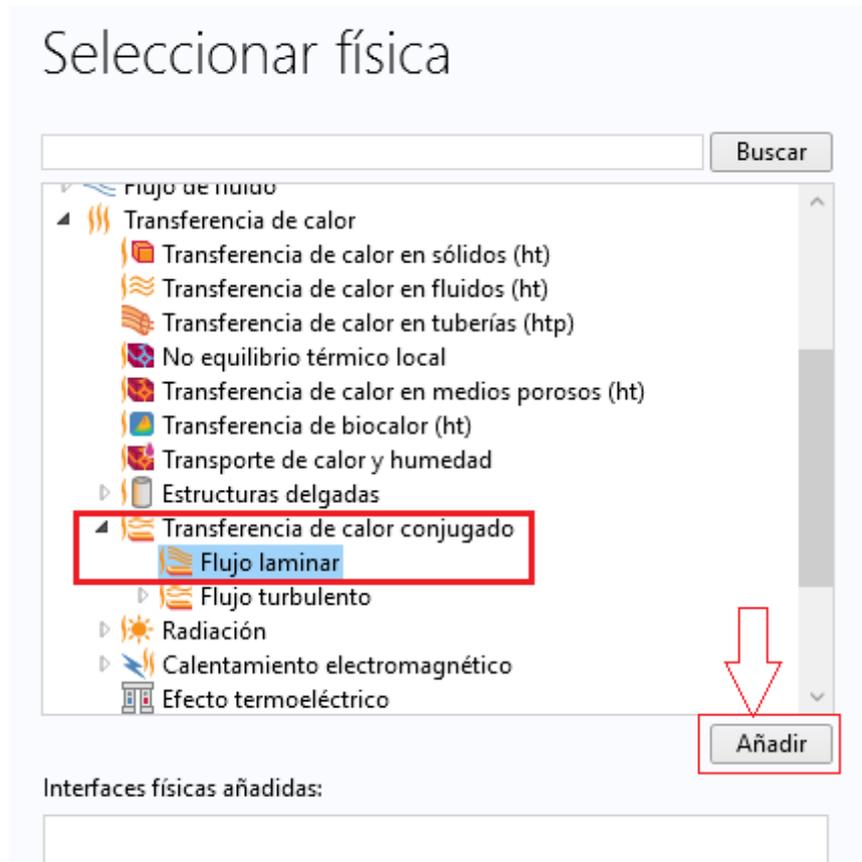


Figura 8.4: Pantalla elección de físicas

Por último, y antes de meternos a realizar ninguna operación relacionada con las características de nuestro modelo en cuestión, debemos elegir si vamos a trabajar en régimen transitorio o estacionario, en nuestro caso, simularemos en régimen estacionario, y ya estamos aptos para empezar a crear la geometría del proyecto.

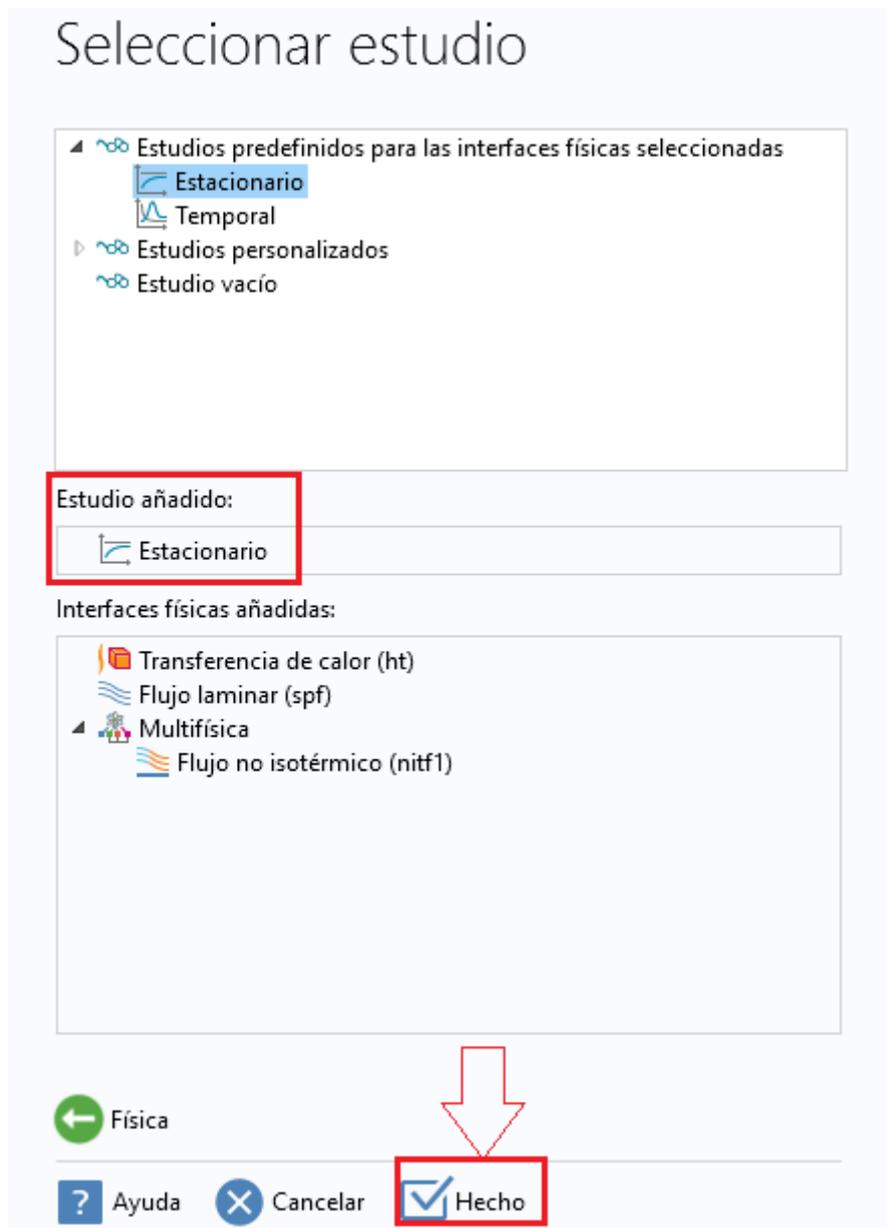


Figura 8.5: Pantalla estudio temporal

Una vez hemos elegido el estudio en estado estacionario, le damos a "Hecho" y empezamos a construir la geometría de nuestro modelo.

8.4 GEOMETRÍA

En COMSOL, una vez hemos realizado todos los pasos previos a la simulación, empezamos con la geometría del problema. Dicha geometría se expone en los planos nº1 y nº2 en la parte de Planos.

COMSOL trabaja de una forma parecida al programa Inventor Autodesk y, de hecho, tenemos la opción de importar un archivo realizado con Inventor para luego introducirle las condiciones de contorno con COMSOL.

Dentro de la geometría, este no es un programa que permita crear estructuras complejas; es preferible acudir a otro tipo de programas e importarlos, ya que es una de las facilidades que se nos ofrece.

El modo de crear una geometría en COMSOL consiste en seleccionar la geometría deseada, posicionarla en el espacio introduciendo las coordenadas en 3D (x,y,z) y, finalmente, caracterizando la geometría con las dimensiones adecuadas. Una vez hemos parametrizado convenientemente las estructuras, daremos al botón de "construir seleccionado" y nos aparecerá en pantalla.

La geometría en la que nos hemos basado para las posteriores simulaciones es la mostrada en la figura 8.6.

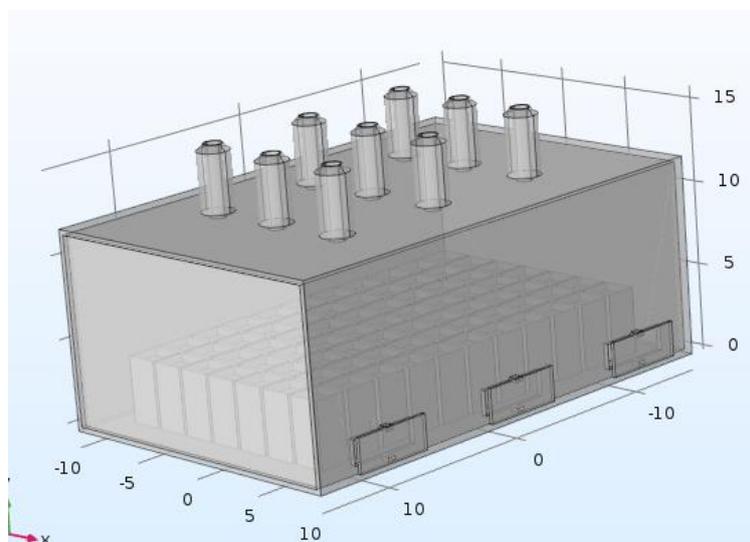


Figura 8.6: Geometría del proyecto



8.4.1 SIMPLIFICACIONES DEL MODELO GEOMÉTRICO

Como ya se ha comentado, se han realizado ciertas simplificaciones en la geometría del modelo, a continuación, las nombramos:

1ª simplificación: Debido a la mayor utilización de RAM a la hora de simular, creamos los contenedores como hexaedros en vez de cilindros, esto será una mejora en lo referente al mallado.

2ª simplificación: El almacén estará dotado exclusivamente de una entrada y una salida de aire por zonas específicas, sin tener en cuenta que parte del aire se escapará por pequeñas ranuras o defectos en la superficie del almacén.

3ª simplificación: El almacén será simulado como un hexaedro de caras planas, mientras que el modelo real tendrá protuberancias para afrontar condiciones climatológicas como puede ser la lluvia y su consecuente evacuación.

4ª simplificación: Las chimeneas de salidas serán simuladas como orificios abiertos en la superficie del almacén.

5ª simplificación: Solamente trabajaremos con una mitad del almacén, para mayor facilidad de simulación, impondremos posteriormente para ello la condición de simetría.

8.4.2 GEOMETRÍA DEL MODELO

En cuanto a la geometría utilizada en esta simulación, se recuerda que se han realizado una serie de simplificaciones respecto al modelo real para la mejor visión y claridad del modelo real a considerar.

El almacén de residuos nucleares gastados que vamos a utilizar de referencia en el trabajo tiene unas dimensiones de 30m de profundidad, 20 metros de anchura y 12 metros de altura, y los contenedores de combustible gastado, serán simulados como cubos, de 4 metros de altura y 2 metros de diámetro.



Por otro lado, se tienen los cascos radiactivos que serán almacenados en una cantidad de 77 contenedores a razón de 120KW de potencia de disipación de calor en cada uno de los cascos uniformemente distribuida en todo su volumen.

En cuanto a la geometría, para las diferentes simulaciones, variaremos la posición de las entradas y salidas del aire, así como las condiciones de entrada del mismo. Es en este punto donde vamos a contemplar una opción escogida de forma personal como es la entrada y salida del aire de forma lateral, esta será la geometría base y, respecto de ella, veremos posibles mejoras al variar ciertos parámetros.

Las dimensiones, acotaciones correspondientes y grosores de los materiales serán expuestos en el documento N°3 donde se verá en detalle cada geometría.

8.4.3 GEOMETRÍA BASE DEL MODELO

Por tanto, construimos la geometría en componentes > geometría > botón derecho y a continuación elegimos primero el bloque y luego cilindro (tantos cilindros como contenedores metamos), asignamos coordenadas y dimensiones y para construir, hacemos click en construir seleccionado.

La geometría en este caso será la mostrada en la figura 8.6. Esta figura corresponde almacén al temporal centralizado en el cual se aprecian las simplificaciones geométricas, así como las entrada y salidas laterales de forma circular y los contenedores con su respectivo contenido interior. Por último, se observa el grosor de 30cm en las paredes del almacén. Se tienen 7 orificios de entrada del aire y 6 de salida.



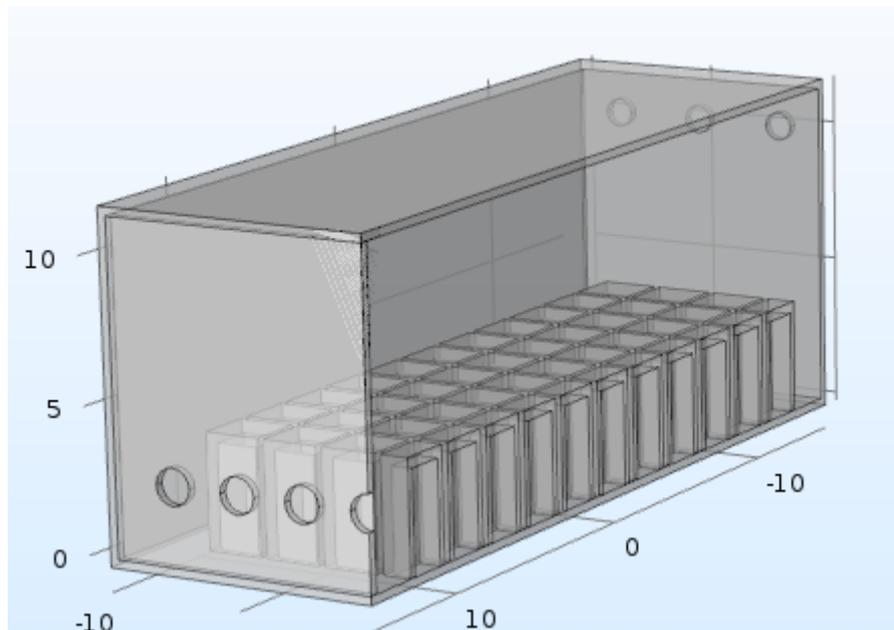


Figura 8.7: Geometría base del modelo de simulación

En la figura 8.7 solamente vemos la mitad debido a la simetría realizada en la simulación.

Respecto al interior del almacén, la geometría es idéntica que en el modelo base.

8.4.4 GEOMETRÍA CON REFRIGERACIÓN NATURAL LATERAL

En este caso, se ha optado por utilizar una figura como la representada en la figura 8.8, en la cual tenemos una entrada lateral en forma de ventanales y la salida se refrigera por la pared superior del almacén.

Los ventanales de entrada tienen unas dimensiones de 450cm de anchura por 150 cm de altura, equidistantes unos de otros. Por otro lado, las salidas circulares (9 en total) tienen un diámetro de 1 metro de longitud.

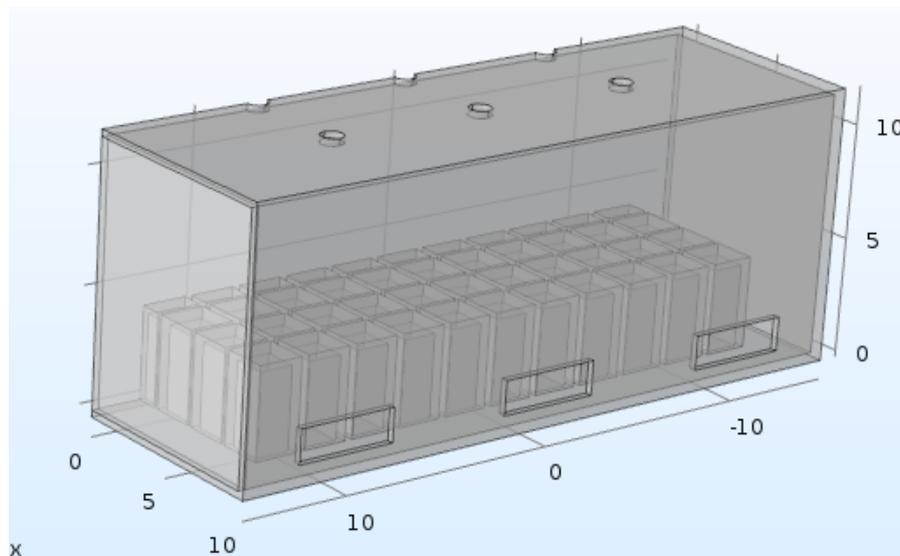


Figura 8.8: Geometría con entrada lateral y refrigeración natural

8.4.5 GEOMETRÍA CON REFRIGERACIÓN FORZADA LATERAL

En este último caso de estudio, lo que haremos será una simulación en el que introduciremos una ventilación forzada, esto lo vamos a representar mediante unas entradas en forma de circunferencias que representan los ventiladores que se utilizarían para dicha refrigeración.

Por el contrario, la salida del aire será por la parte superior, de la misma forma que en el caso expuesto en el punto 8.4.4.

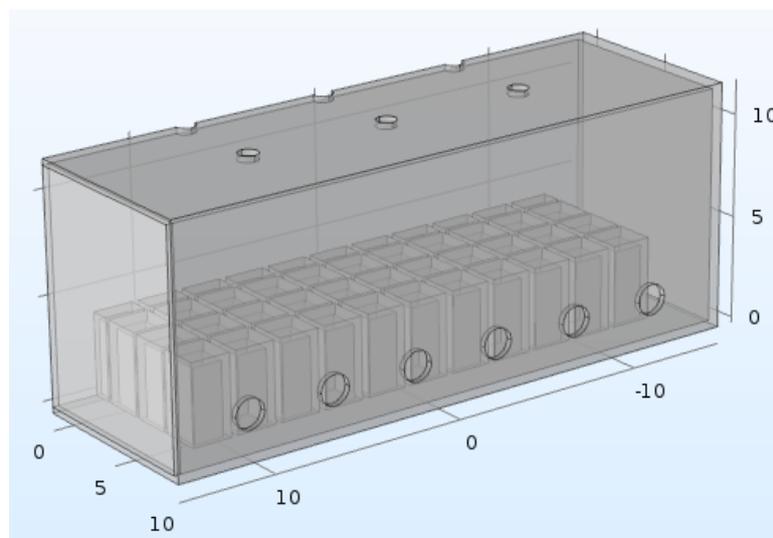


Figura 8.9: Geometría con entrada lateral, refrigeración forzada

8.4.6 DEFINICIONES

Las definiciones, nos permiten identificar un parámetro, geometría, contorno, dominio, arista.... y otorgarle un nombre con el cual, a la postre, trabajaremos sin la necesidad de seleccionar cada dominio en cada operación que realicemos, bastará únicamente con seleccionar la definición requerida.

En nuestro caso, hemos definido la geometría del almacén, es decir, las paredes exteriores del mismo, el fluido (aire), los contenedores, y el interior de esto que será la fuente de calor de la simulación.

Por otro lado, y con la finalidad de obtener unos datos concretos en puntos característicos de la geometría, vamos a colocar unas sondas de medición, para, tras finalizar la simulación, tener resultados.

Las sondas se van a colocar en el interior de uno de los contenedores centrales puesto que es el punto que adquiere mayor temperatura, en uno de los puntos de salida para visualizar la temperatura de salida al exterior y la velocidad de salida del aire.

La leyenda que vamos a utilizar para las sondas es la siguiente:

La sonda 1 indica la temperatura del contenedor central del almacén.

La sonda 2 indica la temperatura en los orificios de salida del almacén.

La sonda 3 indica la velocidad de salida en los orificios de salida del almacén

Todo esto se ve en las figuras 8.10, 8.11, 8.12 Y 8.13

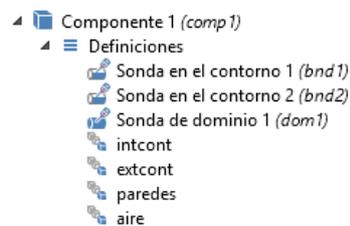


Figura 8.10: Especificaciones de la simulación

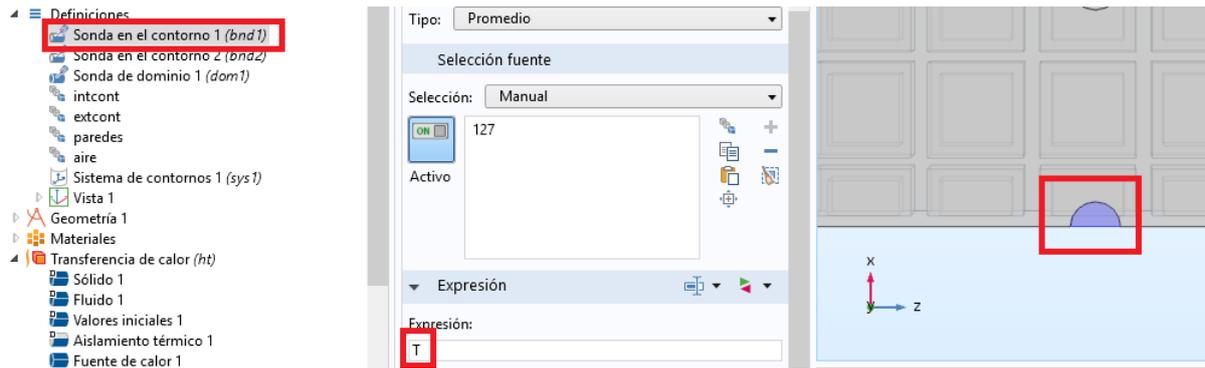


Figura 8.11: Sonda para medir la temperatura de salida

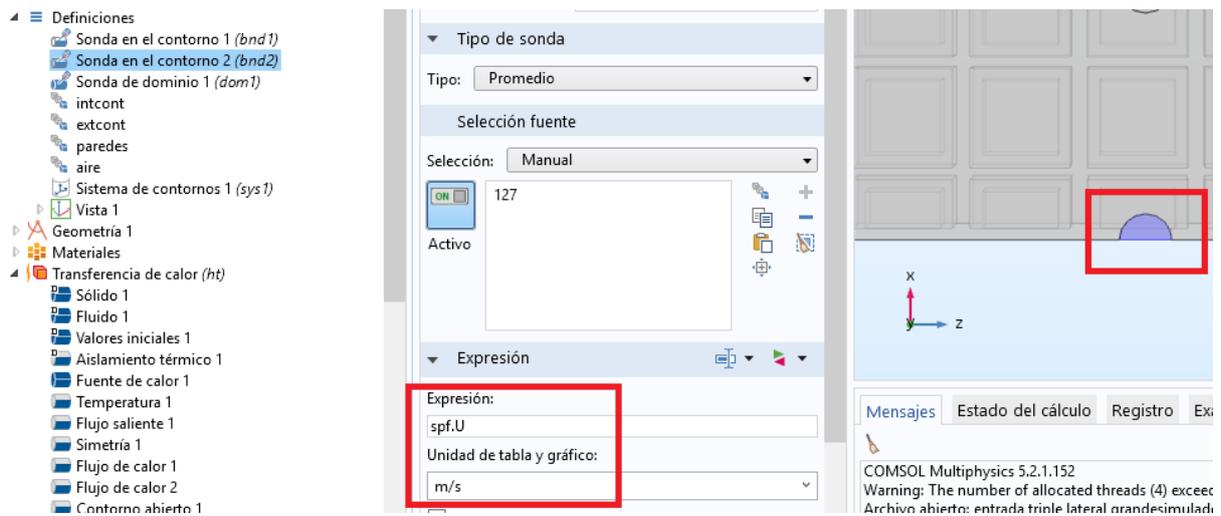


Figura 8.12: Sonda para medir la velocidad de salida

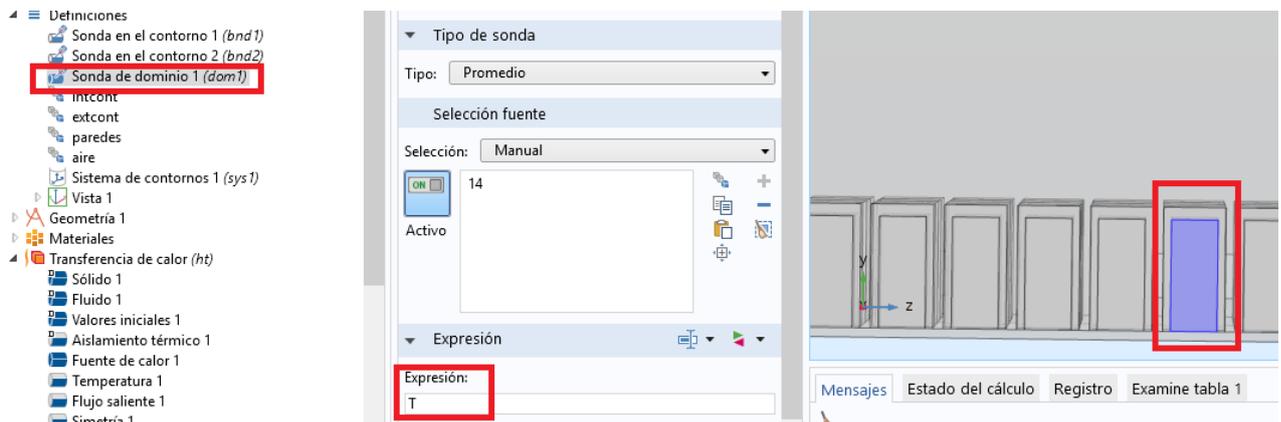


Figura 8.13: Sonda para medir la temperatura máxima

8.5 MATERIALES

El siguiente paso a realizar en COMSOL consiste en elegir los materiales de los que está formada la diferente geometría que integra el modelo de simulación.

COMSOL ofrece una amplia variedad de materiales, los cuales están almacenados en una librería de materiales. Esta biblioteca se subdivide en varias categorías en función de las características de los materiales, las diferentes categorías que nos ofrece COMSOL son:

- Básica: Integra un compendio de materiales versátiles, es decir, no exclusivos de una física concreta.
- AC/DC (corriente alterna/corriente continua): Integra materiales propicios para trabajar con modelos eléctricos, son materiales conductores.
- Baterías y pilas de combustible.
- Biocalor.
- Descarga de equilibrio: Este grupo está compuesto por gases nobles de la tabla periódica, como son el Argón, Helio, Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno.
- Fluidos
- MEMS: Integrado por metales, semiconductores, aislantes y polímeros.
- Magnético no lineal
- Óptico
- Piezoeléctrico
- Piezoresistividad
- Semiconductores
- Termoeléctrico
- Librería definida por el usuario



Para seleccionar un material debemos ir a la biblioteca de materiales, elegir el material que necesitamos y añadir el material al componente al que queremos aplicarlo. Por otro lado, debemos ajustar las propiedades del material elegido, en función de las condiciones del problema.

8.5.1 MATERIALES DEL MODELO

Para nuestro caso, vamos a elegir el aire como material refrigerante, por tanto, los escogemos en la biblioteca de materiales y lo aplicamos al dominio correspondiente en COMSOL. A continuación, exponemos las propiedades del aire (Densidad, viscosidad cinemática, conductividad térmica)

La densidad del aire responde a la siguiente gráfica:

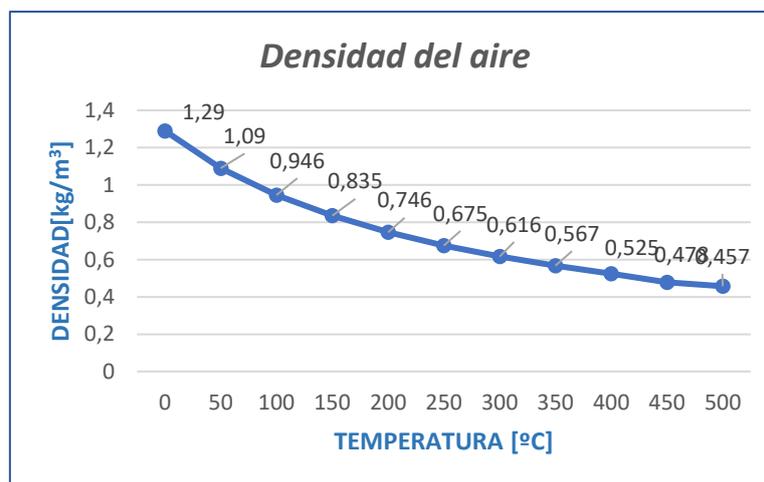


Figura 8.14: Gráfica de la densidad del aire

La viscosidad cinemática del aire cumple la siguiente gráfica:

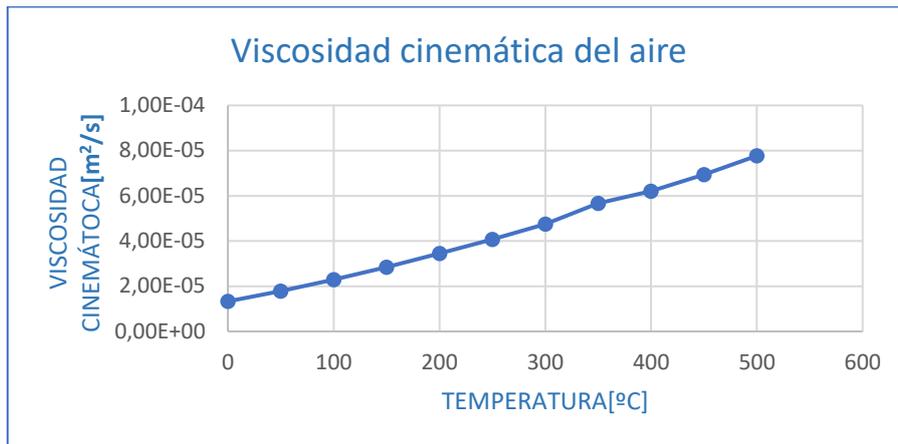


Figura 8.15: Viscosidad cinemática del aire

Vemos como prácticamente sigue un crecimiento lineal del tipo $y \approx mx+n$.

Estas gráficas representan algunas de las características más importantes del aire a tener en cuenta en nuestra simulación. Otra propiedad muy importante es la conductividad térmica, pero en este caso, apenas varía con el aumento de la temperatura, y podemos decir que tiene un valor constante de 0,024 k (W/mK).

Las propiedades del aire para nuestra simulación serán:

Propiedad	Nombr	Valor	Unidad
<input checked="" type="checkbox"/> Viscosidad dinámica	mu	eta(T[1/...	Pa·s
<input checked="" type="checkbox"/> Coeficiente de dilatación adia...	gamma	1.4	1
<input checked="" type="checkbox"/> Capacidad térmica a presión c...	Cp	Cp(T[1/...	J/(kg·K)
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	rho(pA[...	kg/m³
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad térmica	k	k(T[1/K]...	W/(m·...
Permeabilidad relativa	mur	1	1
Permitividad relativa	epsilon	1	1
Conductividad eléctrica	sigma	0[S/m]	S/m
Velocidad del sonido	c	cs(T[1/K...	m/s
Índice de refracción aparente,...	n	1	1
Índice de refracción, parte im...	ki	0	1

Figura 8.16: Propiedades del aire en la simulación

Como se puede ver, vienen ya predefinidas por COMSOL por lo que no necesitamos modificar nada en este caso.

Los otros materiales que vamos a simular son los referidos a los contenedores de combustible gastado, y en esta simulación, se va a con contenedores hechos de Aluminio para la parte interior de los contenedores, y acero para los contenedores (la carcasa externa).

Las propiedades del Aluminio son las de la figura 8.17.

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
Capacidad térmica a presión c...	Cp	893[J/(k...	J/(kg·K)	Básico
Densidad	rho	2730[kg...	kg/m ³	Básico
Conductividad térmica	k	155[W/(...	W/(m·...	Básico
Permeabilidad relativa	mur	1	1	Básico
Conductividad eléctrica	sigma	2.326e7[...	S/m	Básico
Coefficiente de expansión térm...	alpha	23.2e-6[...	1/K	Básico
Permitividad relativa	epsilon_r	1	1	Básico
Módulo de Young	E	69e9[Pa]	Pa	Módulo de Young y coefi...
Coefficiente de Poisson	nu	0.33	1	Módulo de Young y coefi...

Figura 8.17: Propiedades del Aluminio

A su vez, en la figura 8.18 vemos las propiedades del acero:

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Capacidad térmica a presión c...	Cp	475[J/(k...	J/(kg·K)
Densidad	rho	7850[kg...	kg/m ³
Conductividad térmica	k	44.5[W/...	W/(m·...
Permeabilidad relativa	mur	1	1
Conductividad eléctrica	sigma	4.032e6[...	S/m
Coefficiente de expansión tér...	alpha	12.3e-6[...	1/K
Permitividad relativa	epsilon_r	1	1
Módulo de Young	E	205e9[Pa]	Pa
Coefficiente de Poisson	nu	0.28	1

Figura 8.18: Propiedades del acero

Para las paredes del almacén, hemos utilizado hormigón como material, y las propiedades de dicho material son expuestas en la figura 8.19:

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
<input checked="" type="checkbox"/>	Densidad	rho	2300[kg...	kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad térmica	k	1.8[W/(...	W/(m·...
<input checked="" type="checkbox"/>	Capacidad térmica a presión c...	Cp	880[J/(k...	J/(kg·K)
	Coeficiente de expansión tér...	alpha	10e-6[1/...	1/K
	Módulo de Young	E	25e9[Pa]	Pa
	Coeficiente de Poisson	nu	0.20	1

Figura 8.19: Propiedades del hormigón

8.6 CONDICIONES DE CONTORNO

Previamente a la realización del mallado del modelo, se necesitan definir las condiciones de contorno del mismo, es decir, las físicas que interactuarán sobre el sistema global, tanto internas como externas. COMSOL nos permite definir cada física en grupos, por un lado, se encuentran las condiciones de contorno propiamente dichas, y por otro, los límites de dichas condiciones, es decir, las restricciones y características que se van a aplicar sobre cada condición, así como la geometría a la que se va a aplicar la misma.

De otro modo, cabe destacar que para cada geometría se podrán aplicar más de una condición de contorno a la vez, puesto que el programa acopla las diferentes condiciones en torno a las variables dependientes con las que trabajamos, que nuestro caso, corresponden a la temperatura y velocidad, puesto que son el objetivo final de la simulación.

Las condiciones de contorno que vamos a utilizar son las mismas en todas las geometrías, por ello, vamos a explicar cómo se ha trabajado sobre la geometría base expuesta en el punto 8.4.3.

8.6.1 SIMPLIFICACIONES DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO

Al igual que hemos hecho con la geometría, vamos a suponer ciertas simplificaciones en nuestro modelo, para mayor sencillez a la hora de

simular. En este apartado es importante ajustar la simulación a la realidad lo máximo posible, pues es el apartado del que más depende que la simulación sea eficaz. Las simplificaciones tenidas en cuenta son las siguientes:

En cuanto a la transferencia de calor, tenemos:

- La primera y más importante es que, se ha eliminado del estudio la radiación térmica, puesto que no se considera que afecte en gran medida a la simulación
- Suponemos los contenedores como fuentes de calor ideales, es decir, emiten radiación uniformemente repartida por todo su volumen y en todas las direcciones.
- No existe pérdida de calor por el suelo, es decir, no hay transferencia de calor convectivo con el exterior por esa zona.

En cuanto a la mecánica de fluidos:

- No tenemos en cuenta el flujo turbulento de la simulación. Esto se hace debido a que el campo de velocidades es bajo y el fluido sigue un comportamiento laminar.
- Solamente consideramos la entrada de aire por una zona concreta y la salida por otra diferente, suponiendo que por el resto del almacén no hay salida del flujo refrigerador.

Todas estas simplificaciones serán valoradas en el apartado resultados y se dará un veredicto sobre la validez de todas ellas y si nos permiten acercarnos a la simulación real con un error relativo pequeño.

8.6.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

Antes de imponer cualquier condición de contorno, vamos a definir los parámetros globales que, posteriormente, solamente hará falta definirlos con el nombre que los demos.



Los parámetros que necesitamos definir son la potencia que se necesita disipar de los contenedores y la velocidad de entrada del aire en el almacén, bien sea por el ventilador (U_v) o de forma natural (U_0).

Los parámetros se definen en la pestaña "Definiciones globales" → "Parámetros".

Parámetros				
▼ Parámetros				
»	Nombre	Expresión	Valor	Descripción
	P0	120[kW]	1.2E5 W	Total power dissipated by
	U0	0.03[m/s]	0.03 m/s	Mean inlet velocity
	Uv	0.8[m/s]	0.8 m/s	Mean inlet velocity

Figura 8.20: Definición de los parámetros globales

Para las condiciones de contorno de transferencia de calor, empezaremos, al igual que para cualquier condición de contorno de cualquier física, definiendo las características referidas a los dominios y posteriormente, ajustando los límites de las condiciones.

En nuestra simulación, la transferencia de calor se ha de tener en cuenta del siguiente modo.

Lo primero que vamos a definir, como se ha dicho previamente, son los dominios de la física en cuestión. Para ello, y puesto que en las pantallas iniciales hemos definido la física "transferencia de calor conjugado con flujo laminar", el programa por defecto relaciona ambas físicas.

Lo primero que hacemos es definir cuáles van a ser partes sólidas y cuáles fluidos, en nuestro caso, solamente necesitamos definir el fluido interior del almacén. Seleccionaremos la opción "Fluido 1" y le fijaremos manualmente el dominio que en el punto 8.5 hemos asignado como "AIRE", es decir, el interior del almacén.

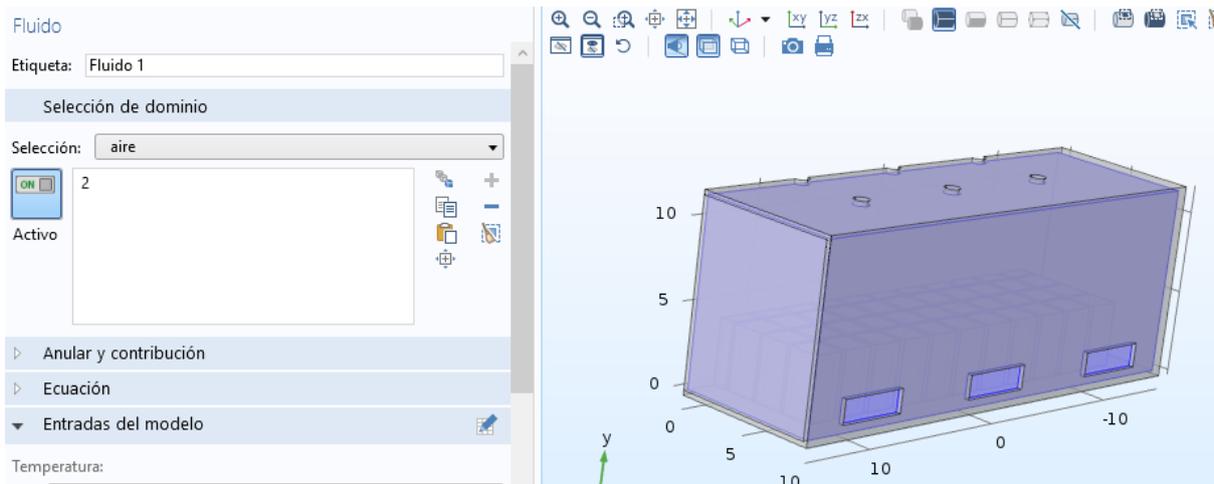


Figura 8.21: Asignación del dominio "aire"

Una vez hemos seleccionado el fluido automáticamente tenemos que el resto de la geometría es sólido. A su vez, se tienen unos valores iniciales predefinidos por el programa, los cuales no vamos a cambiar.

Lo siguiente que vamos a hacer es aplicar la condición de fuente de calor al interior de los contenedores. Esto lo hacemos mediante la condición "Fuente de calor", dentro de los dominios como se ve en la figura 8.22

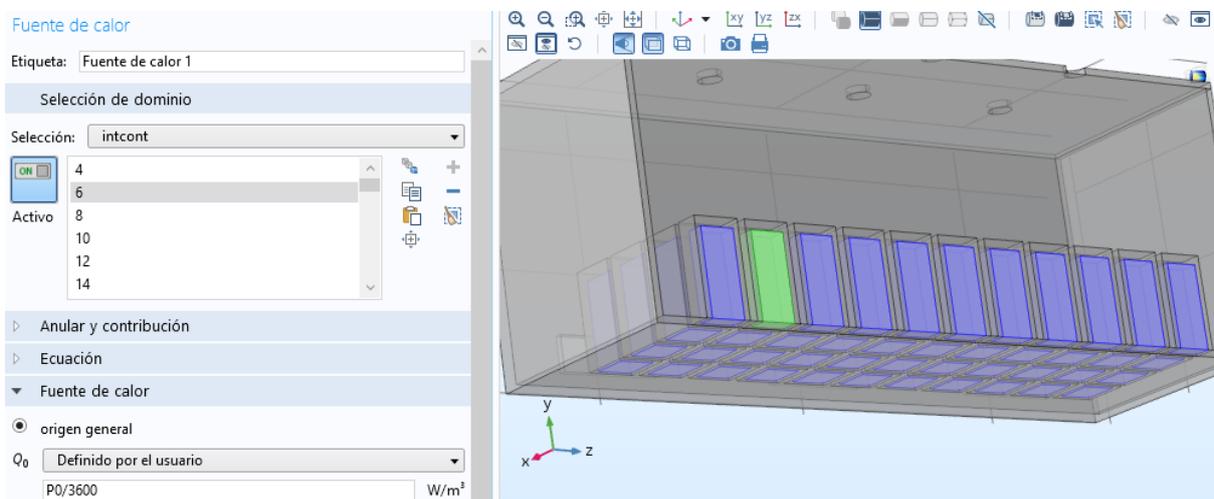


Figura 8.22: Selección de las fuentes de calor

En la figura 8.22, se observa cómo se ha seleccionado el interior de los contenedores, parte que previamente se ha establecido que esté fabricada de aluminio.

Respecto a las condiciones de dominio en la transferencia de calor solamente necesitamos lo anteriormente descrito, a continuación, explicaremos las condiciones límites de dicha física.

Lo primero que vamos a hacer es asignar la temperatura que tenemos en la parte de entrada del aire (orificios de entrada), y lo que haremos será seleccionar el comando temperatura y establecer la temperatura ambiente (20°C por defecto), este parámetro se puede variar en función de las necesidades.

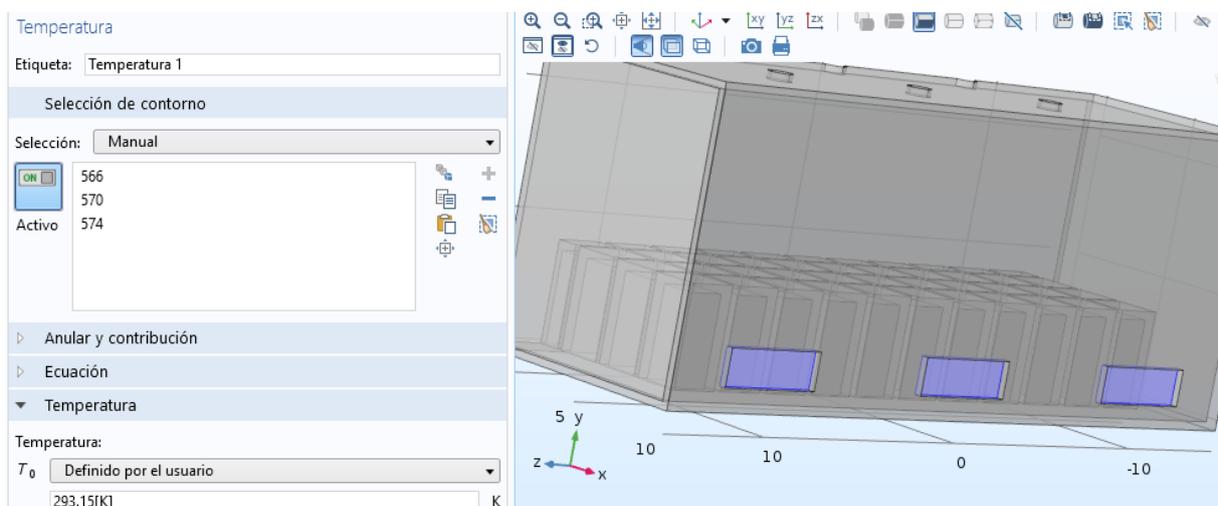


Figura 8.23: Selección de la temperatura de entrada

El segundo aspecto que vamos a tener en cuenta es definir el punto de salida el calor, con la condición "Flujo saliente". El calor se disipará por la parte superior del almacén, por los aliviaderos de salida, por tanto, seleccionaremos la condición de flujo saliente y definiremos dichos agujeros como dominio de esta condición de contorno.

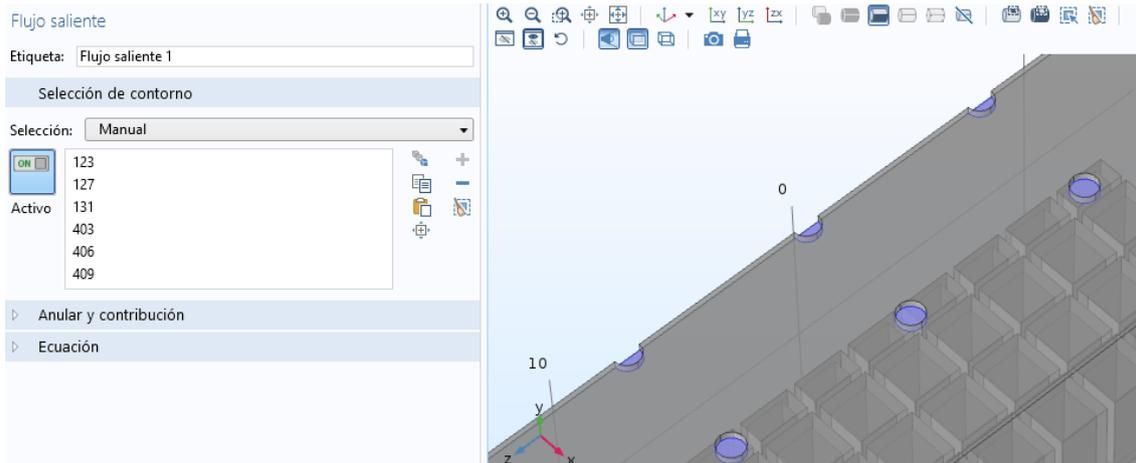


Figura 8.24: Selección del flujo de salida del calor

Debido al intercambio de calor entre la parte interior del almacén y el medio ambiente como consecuencia de que las paredes del almacén no son térmicamente aislantes, debemos suponer también la condición convectiva de transferencia de calor. Esta condición se denomina "Flujo de calor". Seleccionamos pues, esta condición de contorno y la aplicamos a todas las paredes del almacén, ajustando los diferentes parámetros del flujo de calor convectivo, diferenciando si es pared vertical o pared horizontal. La h considerada es, como se aprecia en imagen, la del aire, comprendida entre $5-25\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ para el caso de convección natural.

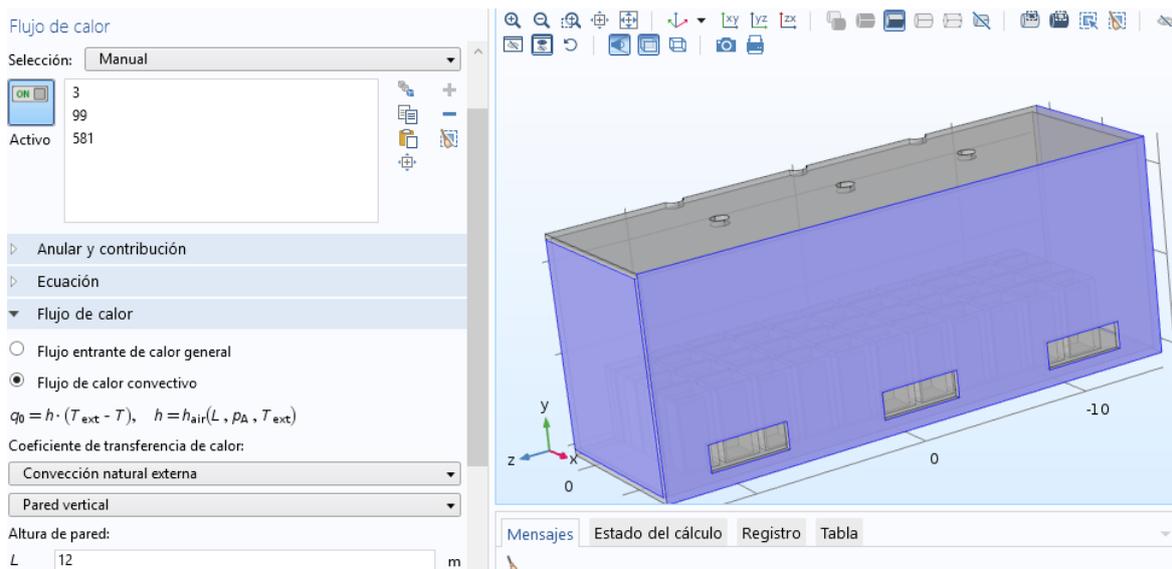


Figura 8.25: Selección de las condiciones convectivas en paredes verticales

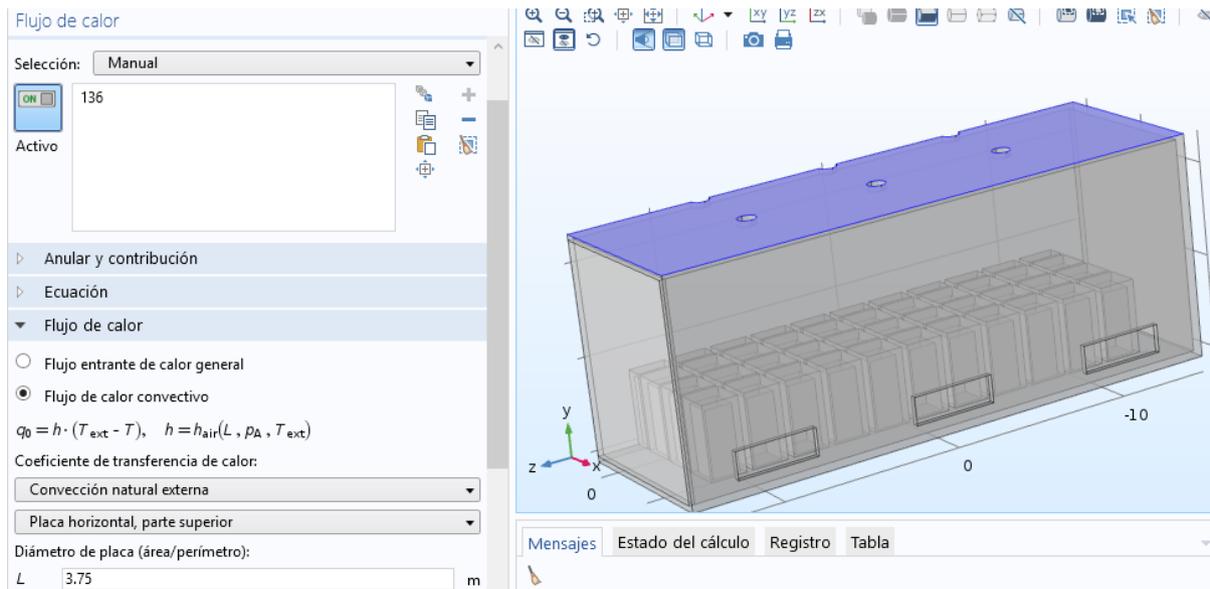


Figura 8.26: Selección de las condiciones convectivas en pared horizontal superior

La siguiente condición que vamos a implantar será la de “Contorno abierto”, esta condición impone que el calor entre y salga libremente por los dominios a los que esté referenciado, por ello, esta condición será aplicable tanto a los orificios de entrada como de salida del calor. Se muestra en la figura 8.27:

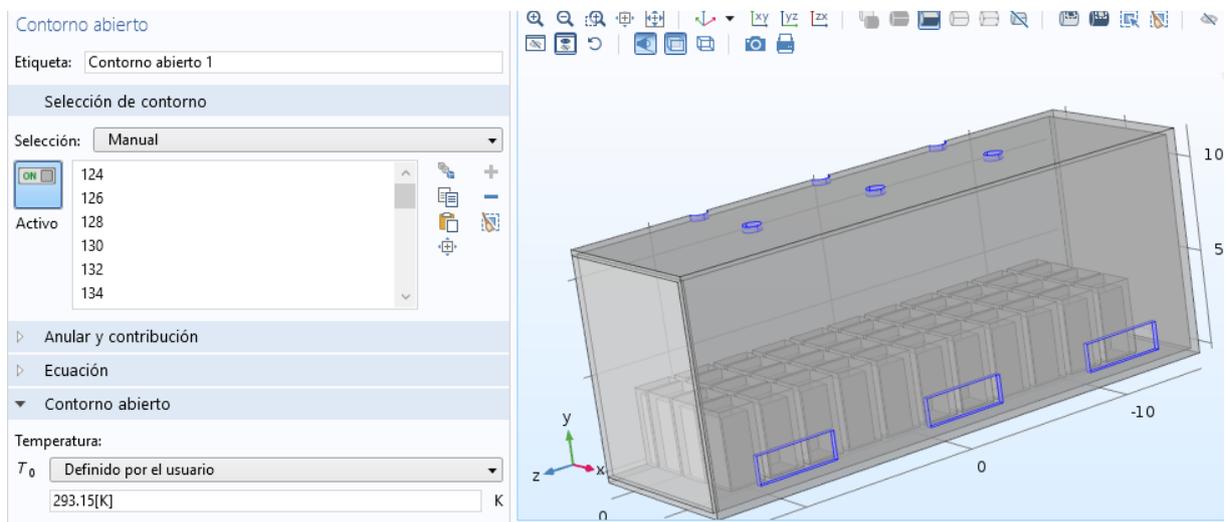


Figura 8.27: Condición de contorno abierto

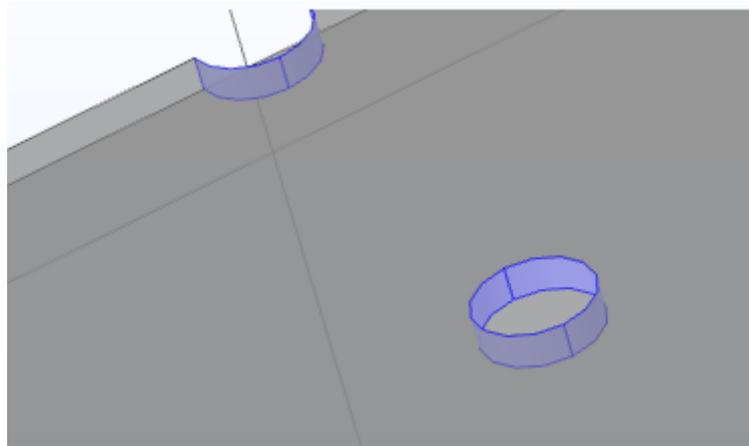


Figura 8.28: Contorno abierto en orificios de salida

Por último, en este apartado, vamos a imponer la condición de "simetría" ya que, por simplicidad, en el punto 8.4 se comentó que la geometría se dividiría en dos. En esta física, será necesario seleccionar como dominio toda la parte que corresponde al eje de simetría, tanto la parte sólida como la parte de fluido, esto se muestra en la figura 8.29

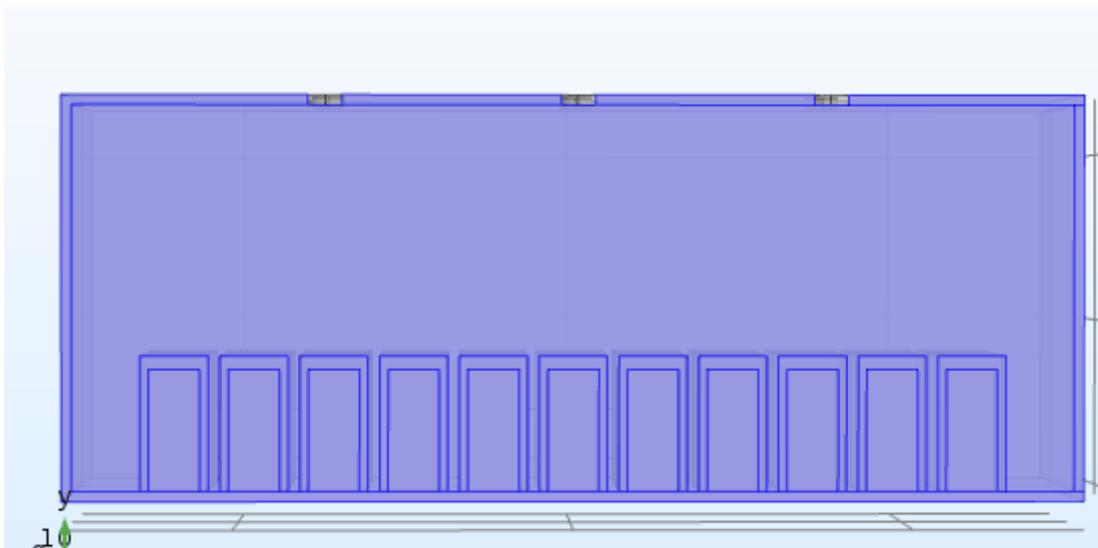


Figura 8.29: Condición de simetría en transferencia de calor

Tras estos pasos, ya tenemos completamente definida la física de Transferencia de calor.

8.6.3 FLUJO LAMINAR

La refrigeración del almacén será por medio de aire y en régimen laminar. El aire, en nuestro problema, entrará en el almacén por una pared lateral, a temperatura ambiente (20°C) y se disipará, caliente, por los aliviaderos de la parte superior del almacén, por lo que nuestra misión en este apartado es definir en COMSOL los puntos de entrada, salida, así como la velocidad, temperatura de entrada del aire (pues no es lo mismo trabajar en Burgos que en Cuenca) y la presión, que, en nuestro caso, y al tratarse de convección natural, trabajamos con la presión atmosférica.

Los datos del viento los hemos sacado de la página "AEMET" y son los datos históricos del viento entre los años 20010-2012, estos datos los exponemos en el anexo I.

A la entrada del aire le impondremos una velocidad de entrada definida en los parámetros como $U_0(0.03\text{m/s})$ para el caso de convección natural y como U_v para el caso de convección forzada.

La velocidad de entrada en el caso de refrigeración natural será prácticamente nula, pues el aire entra libremente. Por el contrario, para el caso de refrigeración forzada, posteriormente se aplicará un barrido paramétrico con diferentes velocidades de entrada comprendidas entre 0m/s y 1.5m/s para visualizar a partir de qué velocidad de entrada deja de ser eficiente la refrigeración.

En la figura 8.30 Se observa los puntos de entrada del aire.

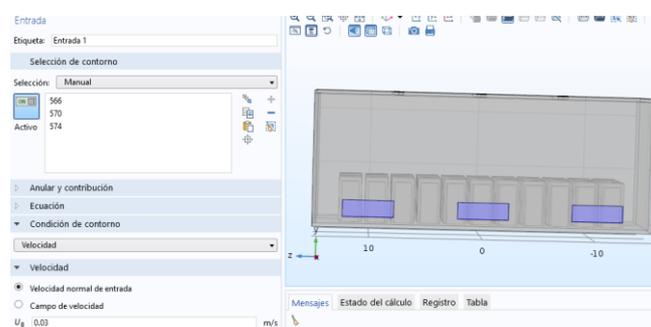


Figura 8.30: Selección del flujo laminar de entrada

Otra condición que tenemos que poner, es la de la salida del aire de refrigeración, condición que impondremos sea por la parte superior del almacén, con una presión relativa de 0 Pa, se muestra a continuación, en la figura 8.31

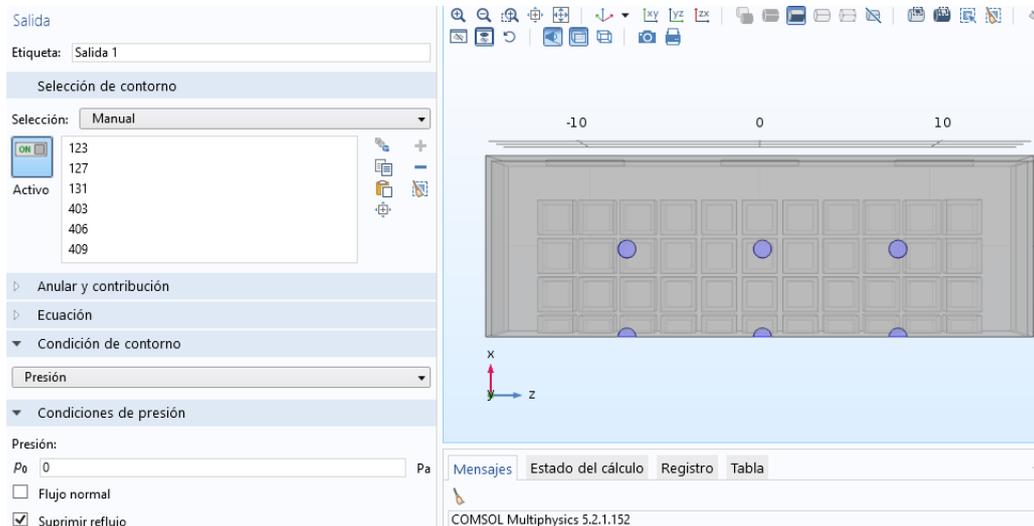


Figura 8.31: Flujo de salida del aire

Como hemos hecho para la física de transferencia de calor, hemos de indicar la condición de simetría para que se tenga en cuenta a la hora de calcular la simulación. En este caso, y a diferencia de la transferencia de calor, la simetría solamente se va a aplicar al único flujo que interviene en la simulación: el aire interior del almacén. Esto se muestra en la figura 8.32:

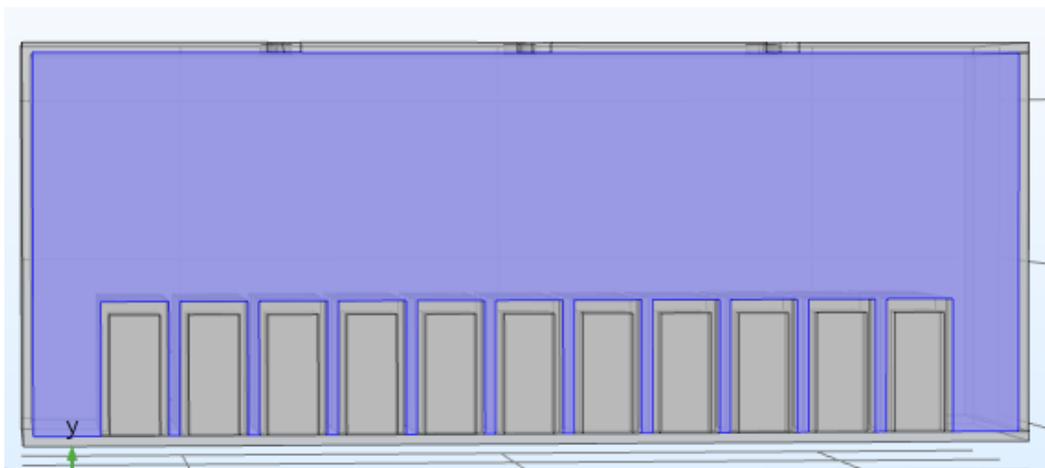


Figura 8.32: Condición de simetría en flujo laminar

Una vez hemos ajustado las condiciones de contorno tanto de transferencia de calor como del flujo laminar, debemos acoplar las dos físicas entre sí, y esto, se realiza en torno a las variables temperatura y velocidad.

COMSOL permite acoplar las diferentes físicas a través de la interfaz "Multifísica", interfaz que al haber seleccionado en las pantallas iniciales la opción "Transferencia de calor conjugado con flujo laminar", por defecto, el programa nos habilita esta pestaña donde ya se tiene en cuenta el acoplamiento.

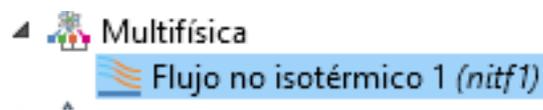


Figura 8.33: Comando "Multifísica" para el acoplamiento de las distintas físicas

8.7 MALLADO

El último paso antes de proceder al estudio de nuestro proyecto y obtener los resultados buscados, es hacer un mallado de la geometría. Esto consiste en dividir la estructura en elementos pequeños en los cuales, en cada uno de dichos elementos, las propiedades y condiciones de contorno son las mismas (las establecidas). Con esto conseguimos que lo que inicialmente era un sistema continuo, ahora sea un sistema discreto apto para la resolución mediante el método de elementos finitos.

Los mallados aplicados pueden tener formas muy diferentes, pudiéndose un mallado distinto para cada elemento, en función del que mejor se adapte al elemento, pues no necesitamos la misma división para un bloque como puede ser nuestro almacén que para un elemento pequeño como puede ser un pistón.

A la hora de valorar el mallado, COMSOL analiza la calidad respecto el valor unidad 1, el valor unidad sería el elemento ideal y valor nulo sería una distorsión total. En nuestro caso tenemos el siguiente mallado.

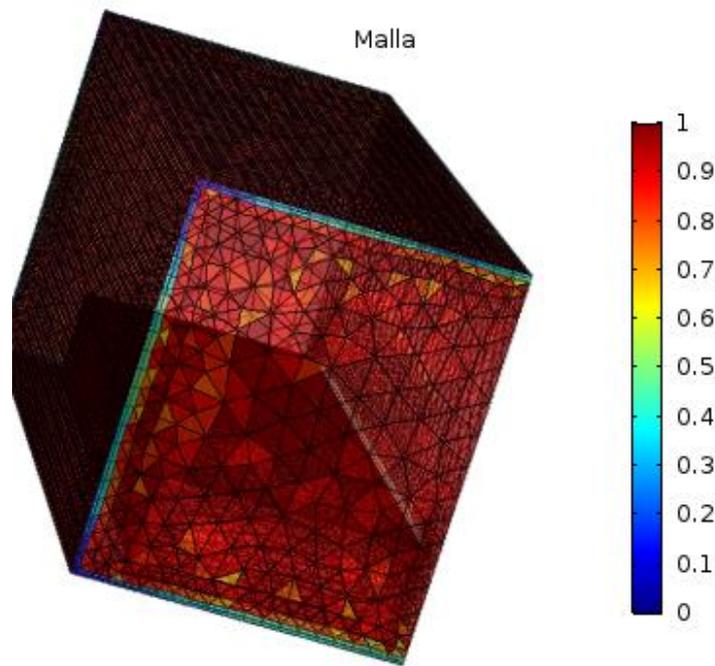


Figura 8.34: Calidad del mallado

8.7.1 MALLADO DEL MODELO

Para nuestro modelo vamos a elegir el tipo de mallado tetraédrico libre, ya que este tipo de mallado se adapta muy bien a los elementos con formas irregulares y a la vez, es el que el programa trae predefinido por defecto.

Entre los diferentes elementos vamos a variar (dentro de que todos tendrán mallado tetraédrico libre) el grosor de la malla, el grosor influye en la cantidad de memoria y tiempo de simulación que se requiere, cuanto menor grosor, mayor poder computacional se requiere. Por tanto, para nuestro caso, vamos a utilizar un mallado grueso, de calidad media, ya que no necesitamos precisión milimétrica.

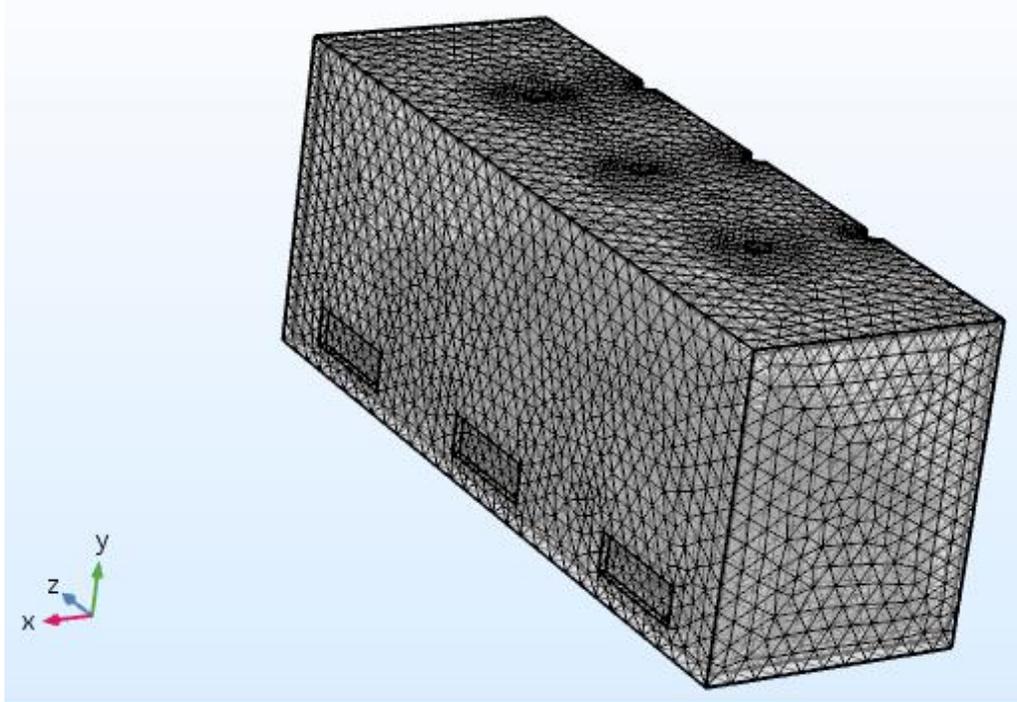


Figura 8.35: Mallado del modelo

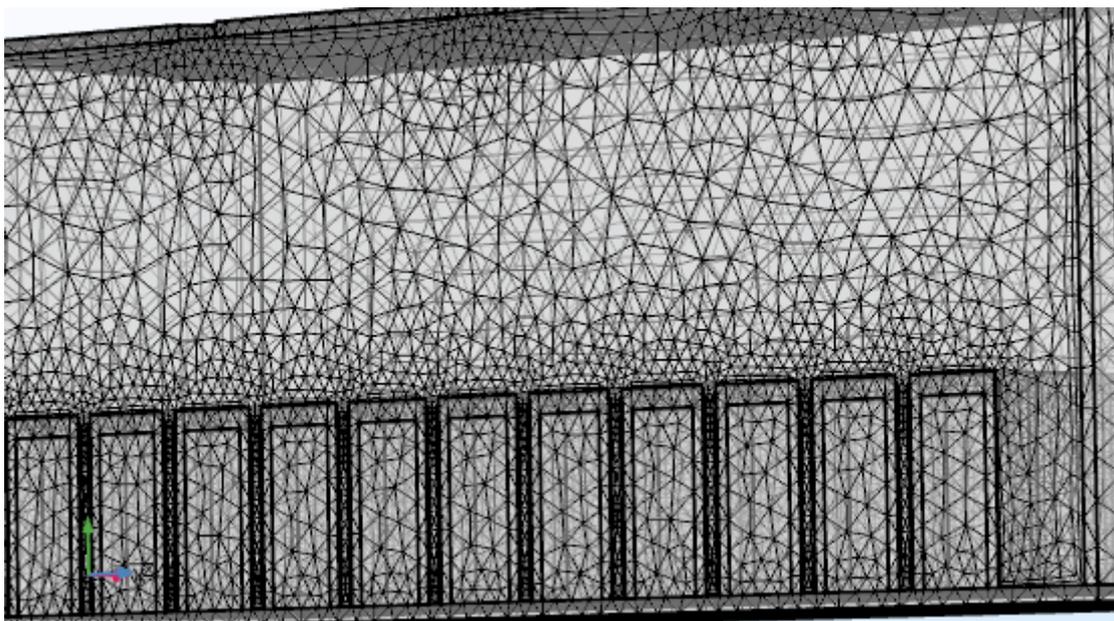


Figura 8.36: Mallado de los contenedores de combustible gastado

La calidad en COMSOL se valora en función de la distorsión de cada elemento de malla respecto al elemento ideal (en este caso triángulo equilátero), cuando la malla se adapta a la geometría a estudiar. De ahí

que un mallado fino se distorsione menos y por tanto, tenga mayor calidad y peso computacional.

Una vez se ha realizado el mallado, tenemos todos los pasos hechos para proceder al estudio y simulación del modelo.

8.7.2 HISTOGRAMA DEL MALLADO

Cuando realizamos el mallado, este será de una calidad mayor o menor en función de la distorsión respecto al elemento base ideal. Los parámetros del mallado, la calidad, el número de elementos de cada tipo, el volumen de la malla, se pueden obtener en el apartado de estadísticas.

A continuación, en la figura 8.37, se adjuntan los datos del mallado realizado en nuestro modelo.

Malla	
	Construir todo
Estadísticas	
Malla completa	
Vértices de malla:	27496
Tipo de elemento:	Todos los elementos
Elementos tetraédricos:	109292
Elementos piramidales:	780
Elementos de prisma:	14594
Elementos triangulares:	10432
Elementos cuadriláteros:	382
Elementos de arista:	593
Elementos de vértice:	16
— Estadísticas del elemento de dominio —	
Número de elementos:	124666
Calidad mínima de elemento:	0.0323
Calidad media de elemento:	0.619
Ratio de volumen de elemento:	1.686E-4
Volumen de malla:	3600 m ³
Tasa máxima de crecimiento:	6.579
Tasa media de crecimiento:	1.928

Figura 8.37: Estadísticas del mallado

En estas estadísticas se observa como tenemos un amplio número de cada tipo de elementos, aunque el elemento principal es el tetraédrico.

La calidad media es de un 62%, esta es una calidad media pero suficiente, y la calidad mínima es de un 3%, el elemento con esta calidad es un elemento muy distorsionado.



Figura 8.38: Histograma del mallado

Vemos en este histograma la representación de la calidad del mallado. Se puede apreciar como tenemos elementos con una calidad muy cerca a la unidad mientras que existen otros con una calidad muy pobre, es decir, con gran distorsión. La varianza del histograma es pequeña, es decir, la gran mayoría de los elementos se concentra en torno a la media.

8.8 CÁLCULO DE LA SIMULACIÓN

El cálculo de la simulación se trata del estudio que hace el programa acerca de todos los parámetros y condiciones establecidas. El programa resuelve los aspectos a calcular mediante operaciones matemáticas internas y a continuación, genera gráficos, tablas, valores derivados. El tiempo de simulación varía en función de la complejidad del problema y las variables, físicas en juego y condiciones de contorno establecidas, pueden existir simulaciones con un tiempo computacional que vaya desde un minuto hasta varios meses.

Otro de los aspectos a tener cuenta es la memoria RAM que ocupa, pues en modelos sencillos no es muy influyente, pero, a medida que el proyecto es más complejo e incluye más físicas, debemos tener en cuenta la memoria RAM requerida, puesto que, con un RAM de poca capacidad, el programa no tendrá recursos suficientes para trabajar y no llegará a converger a ningún resultado.

El solver, es el encargado de resolver la simulación. Tenemos diferentes, cada cual se adapta mejor a la resolución de ciertos tipos de problemas. El solver, es el encargado de resolver la simulación, tenemos diferentes, cada cual se asemeja mejor a ciertos tipos de problemas, depende del número de iteraciones que se realicen en la simulación y la calidad de la malla creada, el solver será más lento o más rápido, y se conseguirá llegar a una convergencia o no. Es en este apartado donde más importancia tiene la capacidad operativa del ordenador.



8.8.1 SOLVER UTILIZADO

El solver que vamos a utilizar va a ser el segregado. Reduce el consumo de memoria significativamente cuando se pretende resolver problemas de grandes dimensiones, como los de interacción fluido-estructura o propagación de ondas en estructuras deformadas térmicamente.

Para hacer una simulación precisa se necesita una RAM, cuanto mejor RAM, mayor precisión podremos conseguir. A la hora de ejecutar el solver, tenemos dos opciones satisfactorias:

1ª opción, utilizar el solver "completamente acoplado"

2ª opción, ir haciendo un barrido de mallas hasta encontrar la malla de más calidad donde nos converja la simulación.

Hemos elegido la segunda opción y por ello elegimos el segregado, el cual presenta las siguientes propiedades de selección:

Segregado

Calcular selección = Calcular

Etiqueta: Segregado 1

General

Técnica de terminación: Tolerancia

Número máximo de iteraciones: 200

Factor de tolerancia: 1

Criterio de terminación: Solución o residuo

Factor de residuo: 1000

Estabilización y aceleración: Paso pseudotemporal

Número CFL inicial: 5

PID regulator-Proporcional: 0.65

PID regulator-Derivative: 0.05

PID regulator-Integrative: 0.05

Estimador de error deseado: 0.1

Resultados mientras resuelve

Figura 8.39: Características del solver "Segregado"

8.8.2 BARRIDO PARAMÉTRICO

El barrido paramétrico es una herramienta que nos permite calcular diferentes resultados a través de realizar la misma operación con diferentes variables. En nuestro caso, la variable será la velocidad de entrada; a mayor velocidad de entrada, menor temperatura tendremos en el almacén.

Los pasos a seguir consisten en:

1. Definir la variable con la que realizaremos el barrido.
2. Damos los valores que adoptará dicha variable.
3. Definir los ajustes de memorias, pues te permite mantener la solución de la última simulación calculada y partir de ahí, o mantener todas las soluciones y realizar la simulación desde cero para el valor concreto de la variable (mayor peso computacional).

A continuación, se muestran en la figura 8.40 los ajustes del barrido paramétrico.

Figura 8.40: Ajustes del barrido paramétrico

8.8.3 RAM NECESARIA

La cantidad de memoria RAM es un aspecto importante a tener en cuenta en la simulación con este tipo de programas. En esta simulación hemos necesitado 2.28 GB de memoria RAM. Este es un valor aceptable si tenemos en cuenta los 8 GB con los que cuenta nuestro dispositivo de simulación.



1.16 GB | 2.28 GB

Figura 8.41: Memoria RAM utilizada (Memoria física/memoria virtual)

8.8.4 TIEMPO DE COMPUTACIÓN

El tiempo computacional en este ejercicio es relativamente pequeño, pues se han realizado simplificaciones que facilitan acortar la tarea de simular. Aun así, para proyectos de mayor tamaño, se necesitan tiempos de computación de semanas incluso meses, para, en ocasiones, no converger hacia ningún resultado correcto. En este caso ha sido suficientes simulaciones de una hora.



Último tiempo de computación:
1 h 12 min 5 s

Figura 8.42: Tiempo de computación

8.8.5 ERROR OBTENIDO

El error lo miramos en los gráficos de convergencia, en los cuales podemos ver tanto el error obtenido para la variable temperatura como para la variable de velocidad.

A medida que avanza la simulación, el error nos converge empezando desde valores de 1 unidad hasta decrecer hasta valores de 10^{-6} para la temperatura y de 10^{-4} para la velocidad, un error muy aceptable para las conclusiones.

A continuación, se muestran los gráficos de convergencia donde aparece el error.



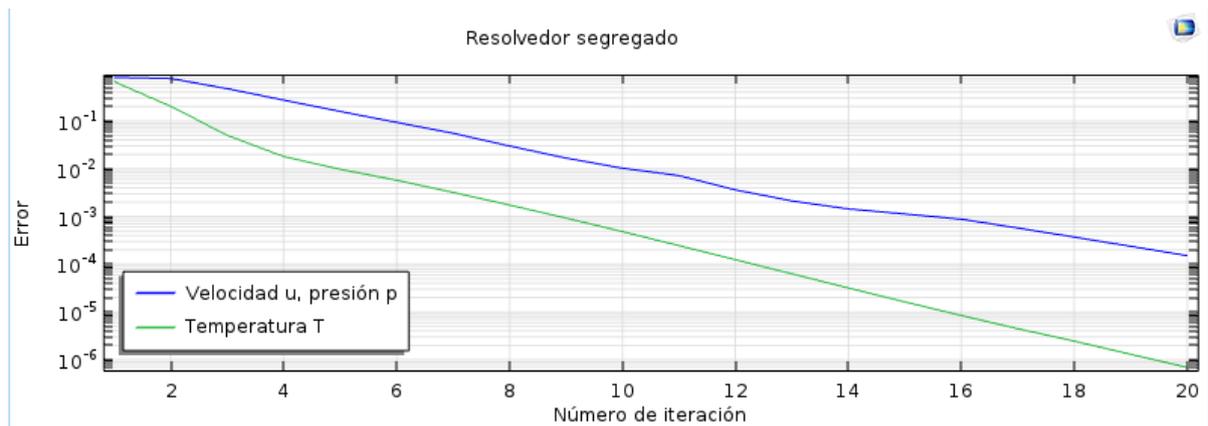


Figura 8.43: Error en la simulación, convergencia

Se aprecia como no han sido necesarias 200 iteraciones, sino que nos ha convergido a la 20 iteración. Esto indica que la simulación tiene una convergencia rápida y aceptable.

8.9 REFRIGERACIÓN CON VENTILADORES

Para realizar un estudio acerca de la rentabilidad del proyecto, vamos a valorar la opción de realizar una refrigeración a través de ventiladores, esto nos permitirá una mejor refrigeración de los contenedores a costa de invertir capital en la compra de un ventilador, con el consumo de electricidad que esto conlleva.

Valoraremos si tiene sentido el uso de ventiladores, y visualizaremos la velocidad de entrada a partir de la cual no existe mejoría significativa en la refrigeración.

En las conclusiones, y mirando los resultados, veremos si las condiciones obtenidas con la refrigeración son suficientes como para su instalación.

Para la simulación del refrigerador en COMSOL, bastará con variar la temperatura y velocidad del aire de entrada hasta los valores que nos proporciona el catálogo del fabricante. También debemos tener en cuenta que la convección ya no será natural sino forzada de manera interna.

9. RESULTADOS

Tras la realización de varias simulaciones variando parámetros (colocación de los puntos de refrigeración y puntos de salida del aire) y visualizando los resultados obtenidos hemos tenido los siguientes resultados para las simulaciones expuestas a continuación:

1º Modelo I (base): Entrada triple del aire por la parte lateral y salida por la parte superior del almacén, refrigeración natural.

2º Modelo II: Entrada por la parte lateral pequeña y salida por la parte lateral opuesta, refrigeración natural.

3º Modelo III: Entrada del aire por la parte lateral, impulsado mediante ventiladores que mueven el aire para refrigerar el almacén y salida del aire por la parte lateral contraria del almacén.

9.1 TABLA RESUMEN DE TEMPERATURAS, VELOCIDADES Y PRESIONES

En las simulaciones realizadas, hemos instalado sondas para obtener datos concretos en los puntos interesantes como se ha indicado en el punto 8.4.6.

Con estas sondas, vamos a conseguir datos de temperaturas en la salida del aire, en el contenedor central del almacén (el que va a tener mayor temperatura) y la velocidad de salida del almacén del aire.

La Tabla 9.1 presenta:

	Modelo base			Modelo II Refrig.Natural			Modelo III Refrig.Forzada Vel. Entrada: 0.3(m/s)		
	Sonda 1 Temp Cont. (°C)	Sonda 2 Temp sal. (°C)	Sonda 3 Vel. Sal. (m/s)	Sonda 1 Temp. Cont. (°C)	Sonda 2 Temp sal. (°C)	Sonda 3 Vel. Sal. (m/s)	Sonda 1 Temp Cont. (°C)	Sonda 2 Temp sal. (°C)	Sonda 3 Vel. Sal. (m/s)
RESULTADOS	128	38	0,19	431	73	0,078	35	27	4

Tabla 9.1: Resumen de temperaturas y velocidades



Observamos una diferencia de 93 grados de temperatura máxima al pasar de tener una refrigeración prácticamente nula a tener una refrigeración forzada debida a ventiladores. Por otra parte, se observa como existe una elevada temperatura de salida del aire en la refrigeración forzada respecto a la refrigeración natural, debido a que con esta ventilación la capacidad refrigerante del aire es muy superior.

9.2 MODELO BASE

9.2.1 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

Las temperaturas se distribuyen de la siguiente manera, primero ponemos la gráfica de las temperaturas sin ventilador.

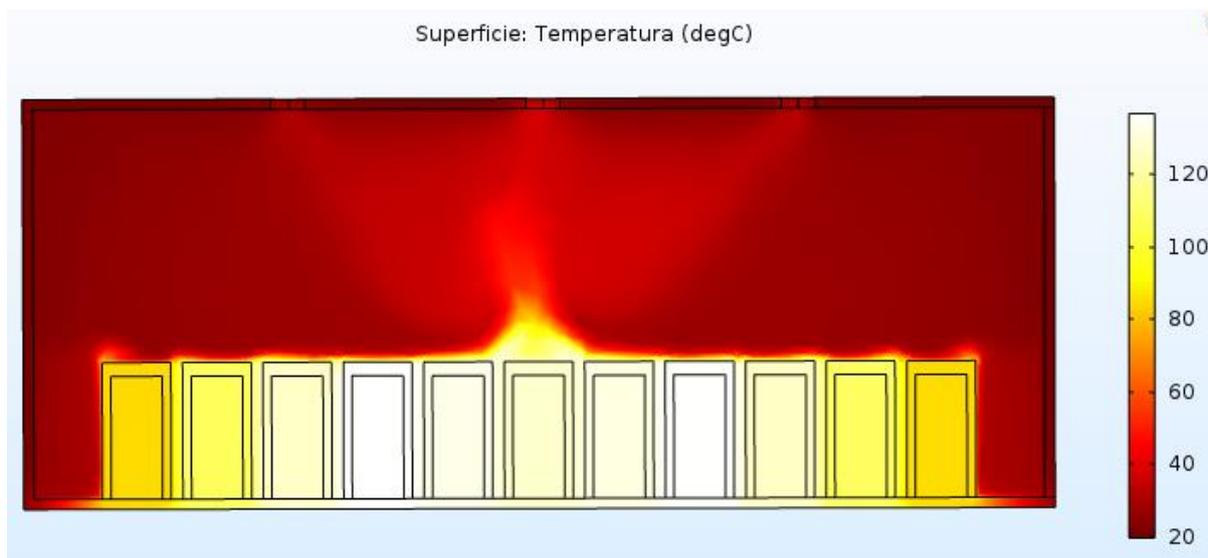


Figura 9.2: Distribución de temperatura modelo I en el plano de simetría.

En esta figura, observamos como la temperatura máxima se elevan hasta los 120°C, disminuyendo hasta los 100°C en los contenedores situados en la parte más periféricos.

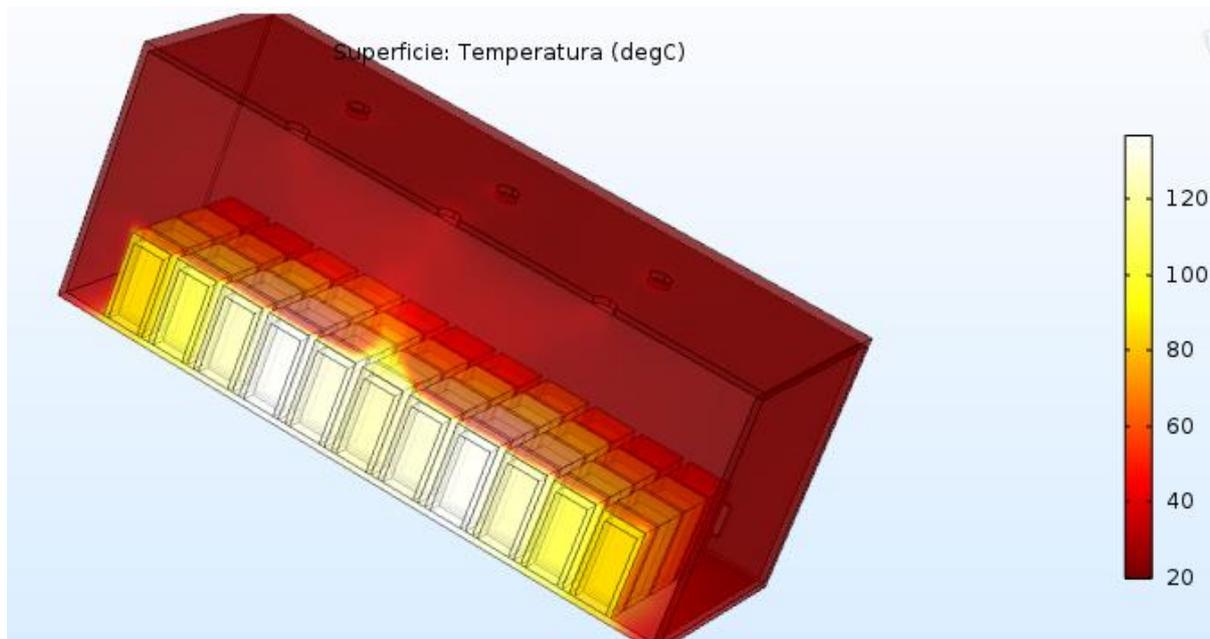


Figura 9.3: Perspectiva del almacén donde se muestran la distribución de temperaturas del modelo I

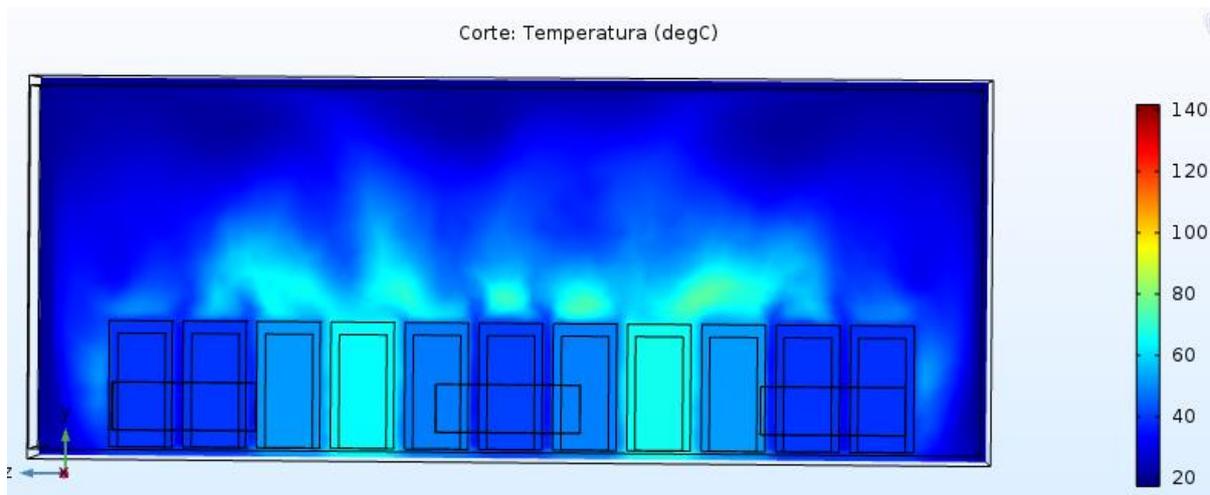


Figura 9.4: Distribución de temperatura del modelo I en el plano situado en la fila de contenedores más cercana a la entrada del aire

Observamos como la temperatura es mayor en la parte central de los contenedores, alcanzando unas temperaturas máximas de 130°C. Ésta es una temperatura elevada pero bastante menor que la temperatura de fusión del aluminio.

Una vez nos alejamos de las fuentes de calor, la temperatura decae rápidamente hasta alcanzar una temperatura ligeramente inferior a los 30°C.

También se puede observar como los contenedores de la parte central reciben calor de los contiguos a ellos, y, por tanto, presentan mayor temperatura.

A continuación, vemos los gráficos de velocidad para este modelo base.

9.2.2 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD

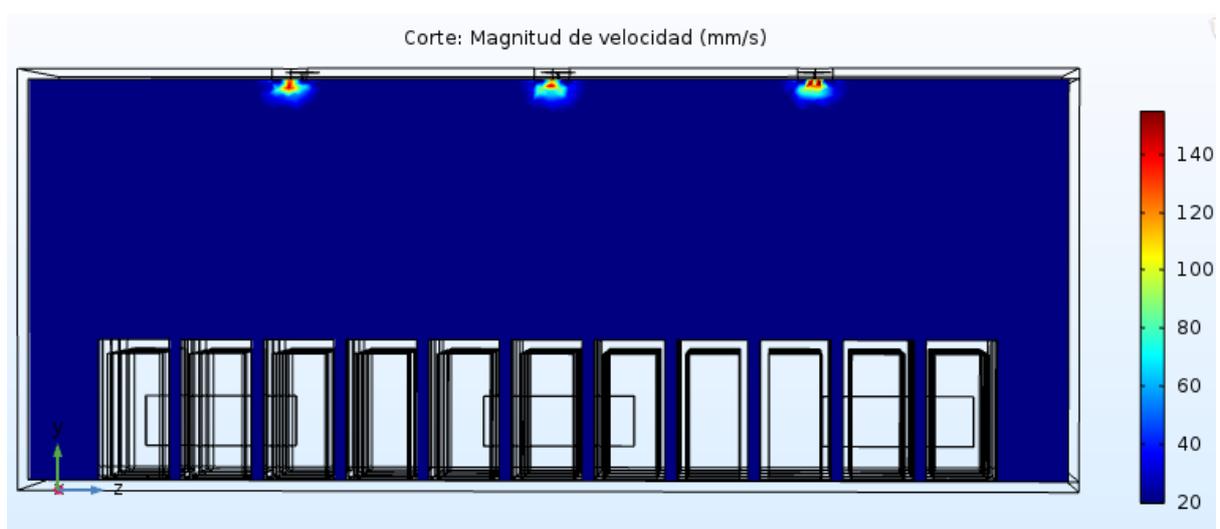


Figura 9.5: Corte de la velocidad en el plano de simetría modelo base

Los orificios de salida del aire recogen todo el flujo de aire del almacén. Por ello, para poder evacuarlo, aumenta su velocidad significativamente. A continuación exponemos imagen más ampliada de la salida del aire.

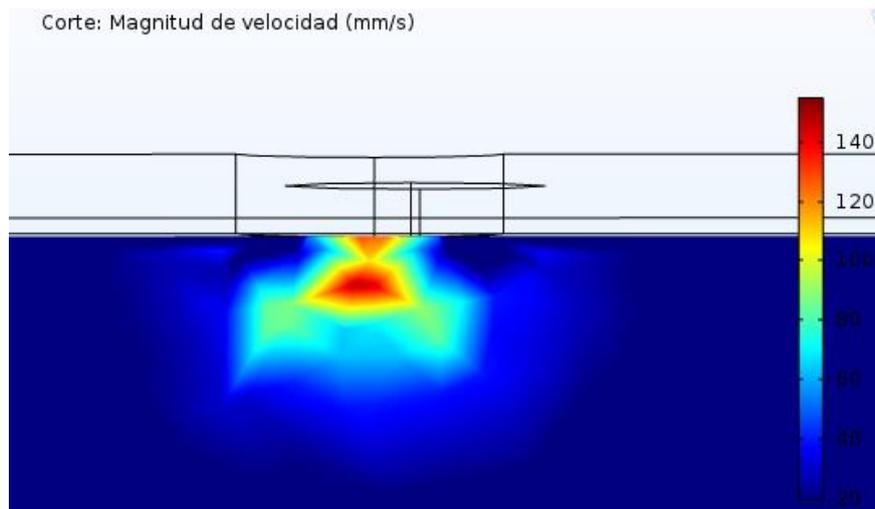


Figura 9.6: Distribución de velocidad en modelo base (Imagen ampliada de la boca de salida)

En esta ampliación se ejemplifica claramente como la parte central del chorro de aire eleva su velocidad hasta magnitudes relativamente superiores a la velocidad de entrada, la cual es prácticamente nula (de los 30 mm/s de entrada pasa a casi 150 mm/s en la salida).

Esto se debe al principio de conservación de la masa, es decir, todo el aire entrante debe salir, por ello, la velocidad de salida debe ser superior.

9.3 MODELO II (REFRIGERACIÓN NATURAL)

9.3.1 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

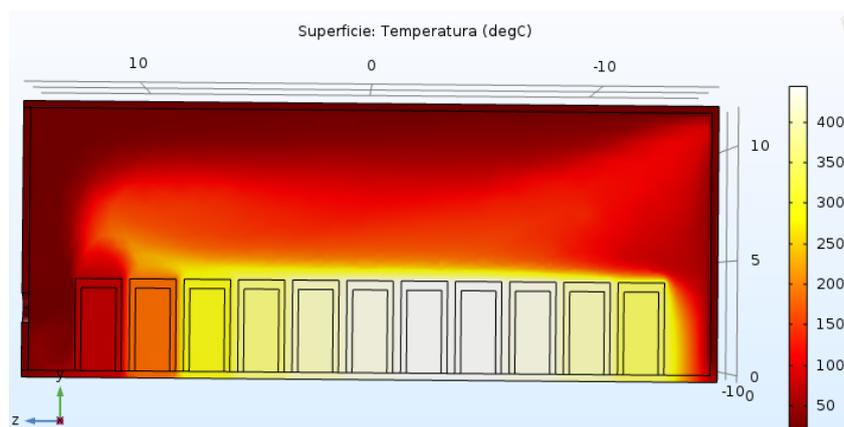


Figura 9.7: Distribución de la temperatura del modelo II de la refrigeración natural en el plano de simetría.

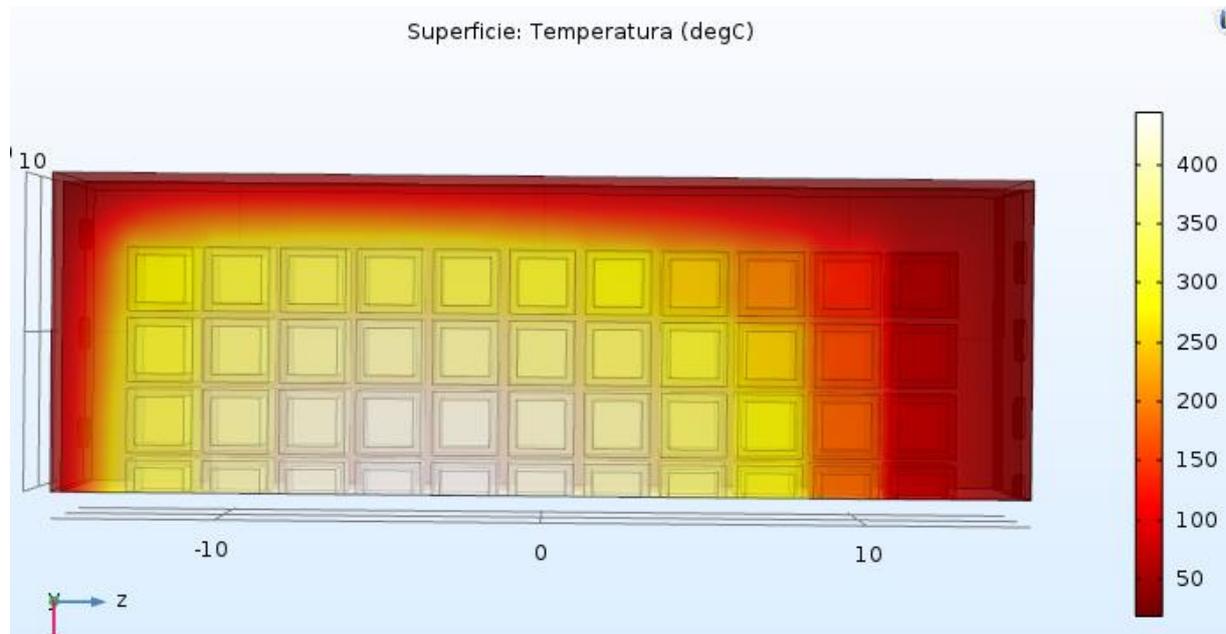


Figura 9.8: Distribución de temperatura del modelo II de refrigeración natural visto desde la parte inferior del almacén.

Se observa cómo, al igual que en el modelo I, las temperaturas en la parte central son más elevada que en los extremos, siendo el extremo más cercano a la entrada del aire el que experimenta mayor refrigeración. Las temperaturas de este modelo alcanzan temperaturas superiores al modelo base, llegando a alcanzarse los 431° centígrados como vemos en la tabla de sondas expuesta en el punto 9.1. Por el contrario, justo en la salida tenemos temperaturas, aunque elevadas, de menor magnitud como son 72° centígrados.

A continuación, vemos los gráficos de velocidad para este modelo base.

9.3.2 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD

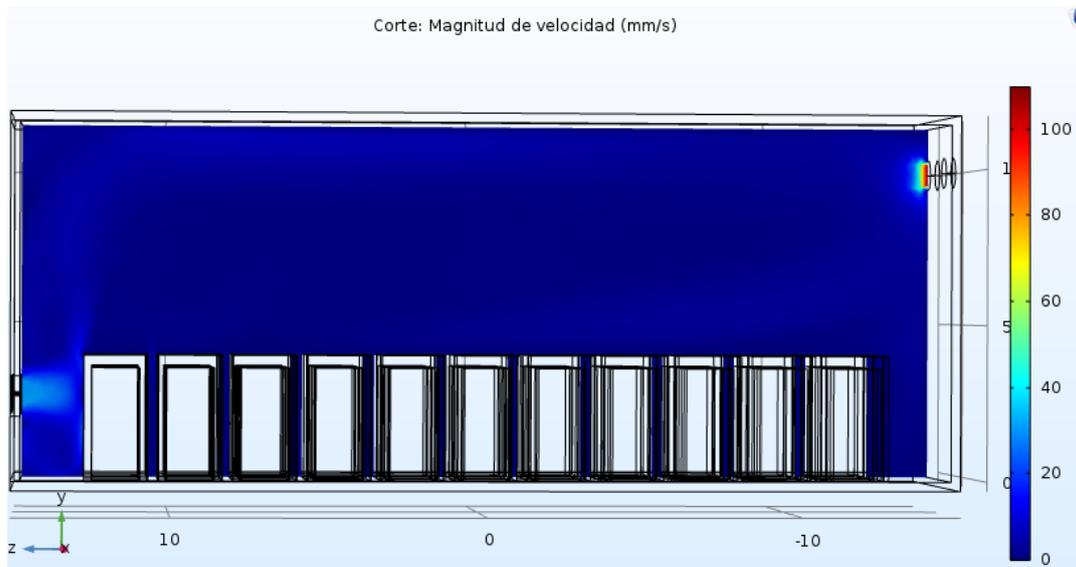


Figura 9.9: Corte de velocidad del modelo II de refrigeración natural con el corte situado en el plano de simetría.

Respecto a la velocidad, Figuras 9.9, 9.10 y 9.11, vemos como existe una velocidad de 30mm/s en la entrada y en el punto de salida, sufre una aceleración hasta alcanzar los 100mm/s. Este modelo no sufre tanta diferencia de velocidad de la entrada respecto de la salida y se ve como la velocidad en todo el volumen del almacén es menor que en el caso del modelo base.

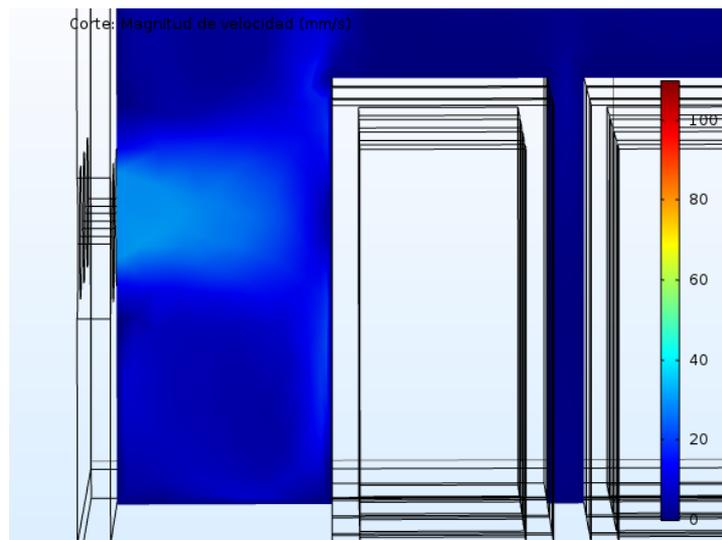


Figura 9.10: Imagen ampliada de la velocidad de entrada del aire en el modelo II

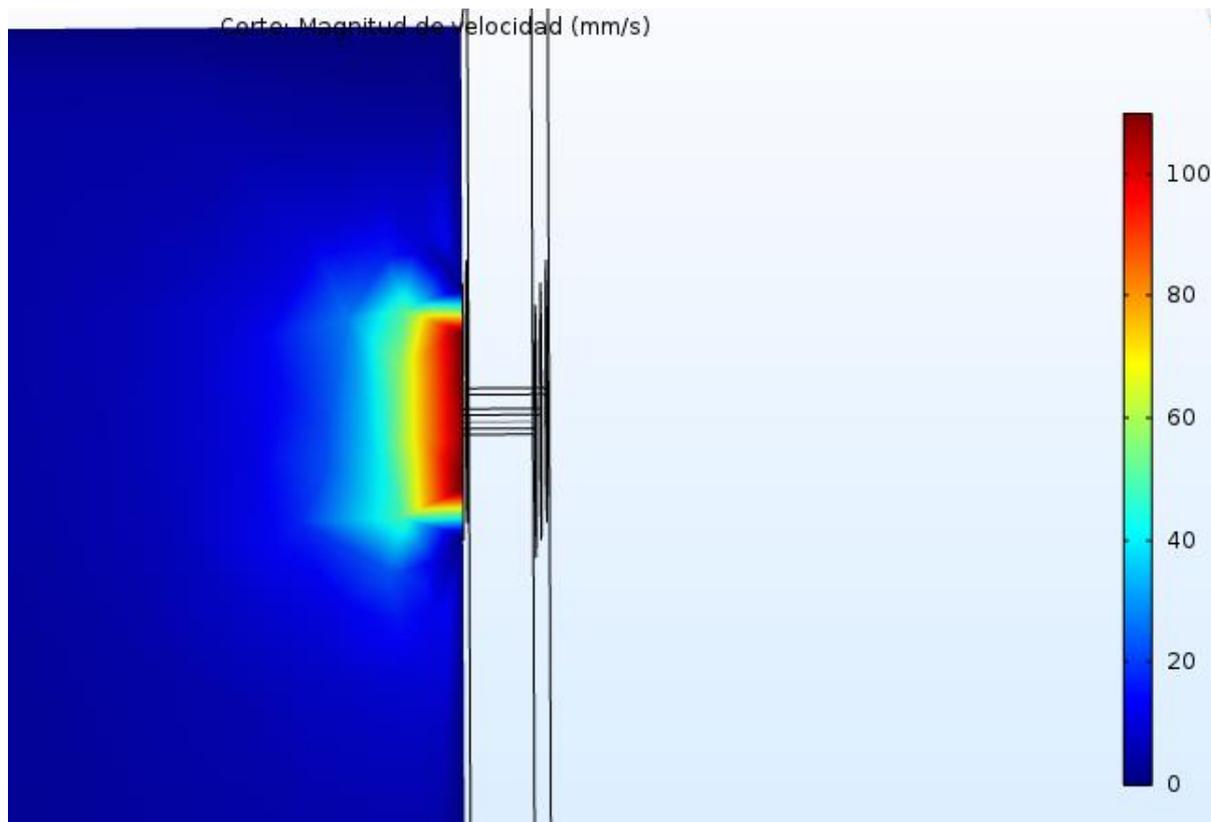


Figura 9.11: Ampliación de la velocidad de salida del aire en el modelo II

9.4 MODELO III (REFRIGERACIÓN FORZADA)

Para este último caso, hemos realizado una simulación mediante un barrido paramétrico, el cual nos dará la posibilidad de visualizar la mejora en la refrigeración para diferentes valores de entrada y así, concluir a partir de qué velocidad deja de ser rentable. Los valores de la velocidad de entrada a estudiar serán 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m/s.

9.4.1 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

Las temperaturas obtenidas serán las expuestas en las figuras que a continuación se exponen.

Para el caso de velocidad de entrada nula tenemos:

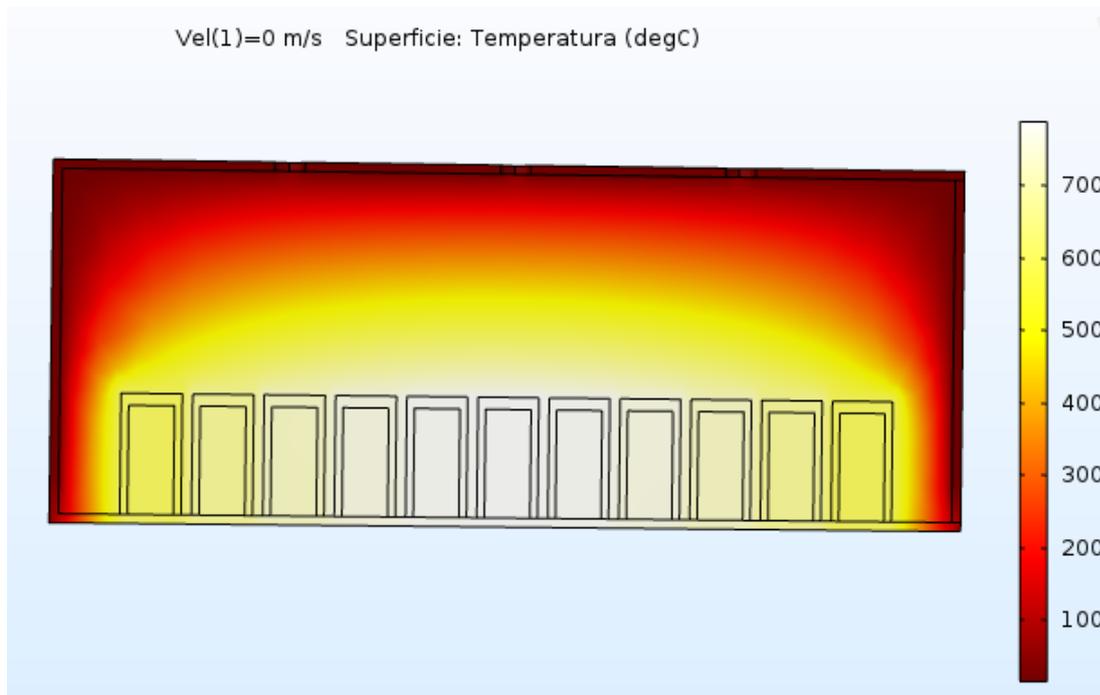


Figura 9.12: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada nula
 Para una velocidad de entrada nula se observa como las temperaturas máximas que se alcanzan son del orden de los 700°C, disminuyendo hasta los 100°C en los puntos de mínima temperatura.

La siguiente velocidad de entrada será de 0.1 m/s.

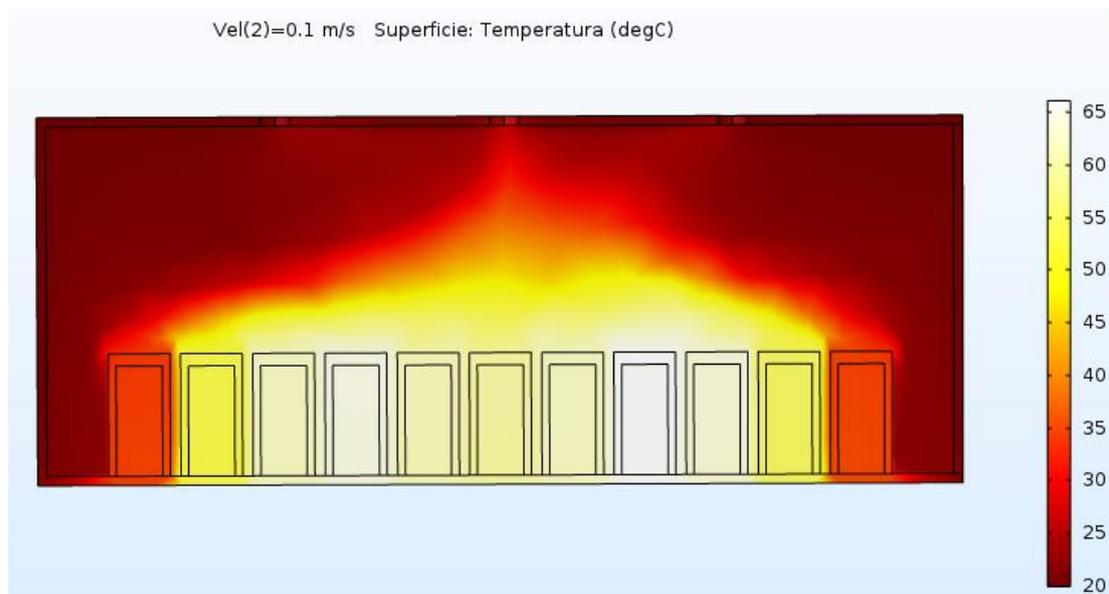
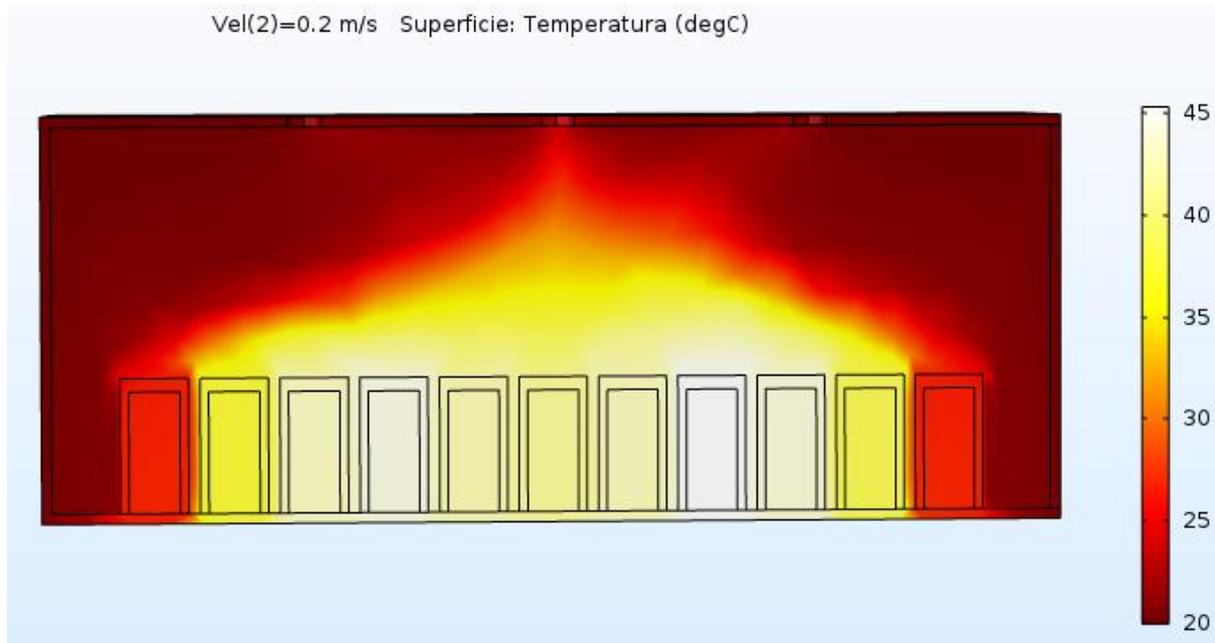


Figura 9.13: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,1m/s

Para la velocidad de entrada de 0,1 m/s se observan temperaturas de 340K (67°C) en los puntos de mayor magnitud y de 310K(37°C) en los contenedores periféricos.

La siguiente velocidad de entrada es de 0,2 m/s, para la cual tenemos los siguientes resultados:



9.14: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,2m/s

En este caso, se alcanzan temperaturas máximas de 320K (47° C), temperaturas todavía muy elevadas en los contenedores centrales y zonas próximas a estos. Por el contrario, se tienen temperaturas de 25-30 grados centígrados cuando te alejas a un par de metros de los contenedores.

La siguiente velocidad de entrada es de 0,3 m/s, para la cual tenemos los siguientes resultados:

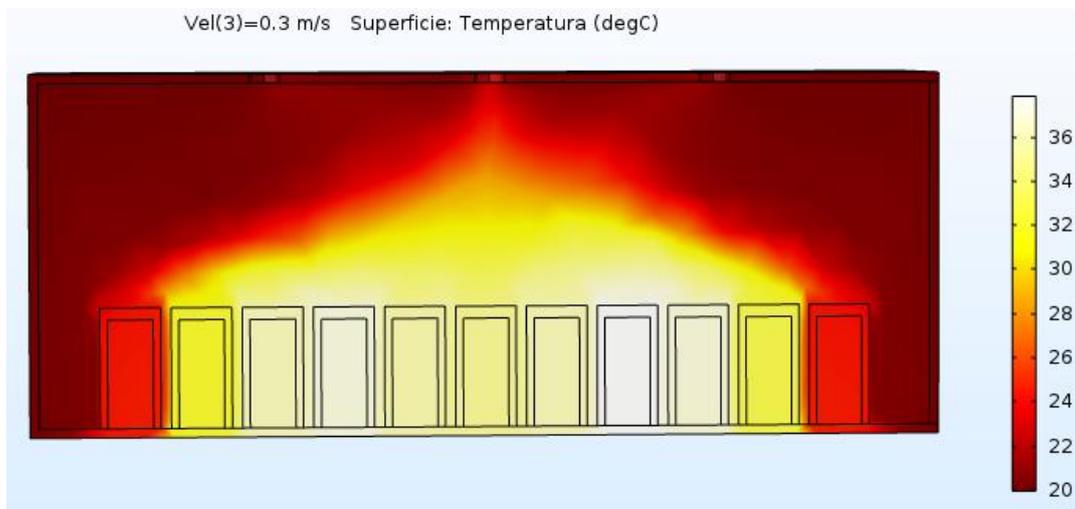


Figura 9.15: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,3m/s

Para este caso, las temperaturas máximas se sitúan en torno a los 310-311K (37°C-38°C), llegando a niveles de 25°C en los contenedores más periféricos.

A continuación, exponemos los resultados para una velocidad de entrada de 0,4 m/s:

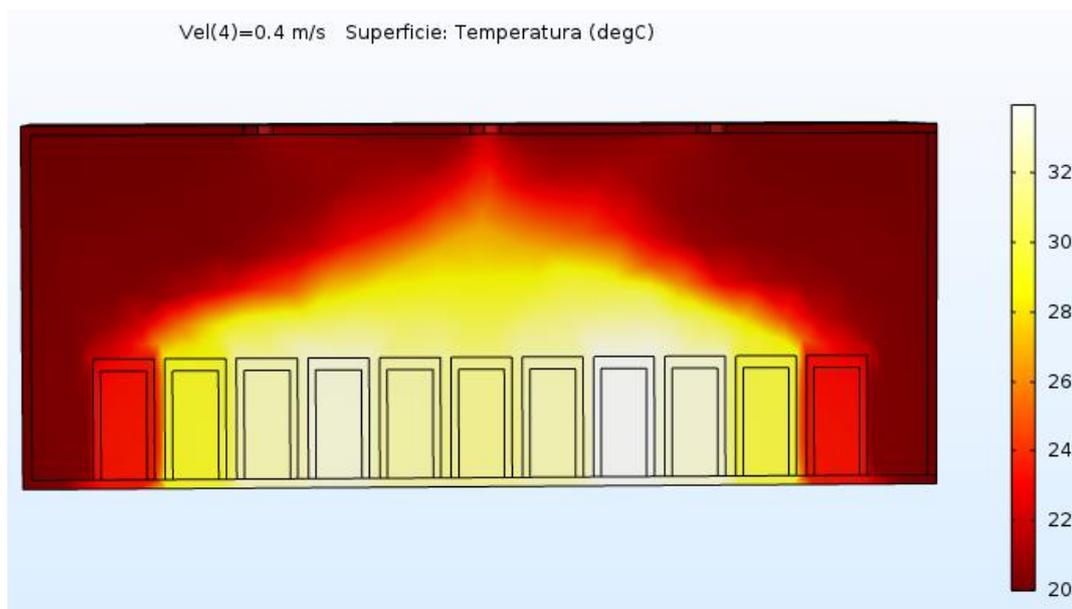


Figura 9.16: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,4m/s

En este caso, la temperatura máxima que se alcanza es de 307K(34°C) y la temperatura en los contenedores periféricos es del orden de los 298K(25°C).

Por último, exponemos los resultados para una velocidad de entrada de 0,5 m/s:

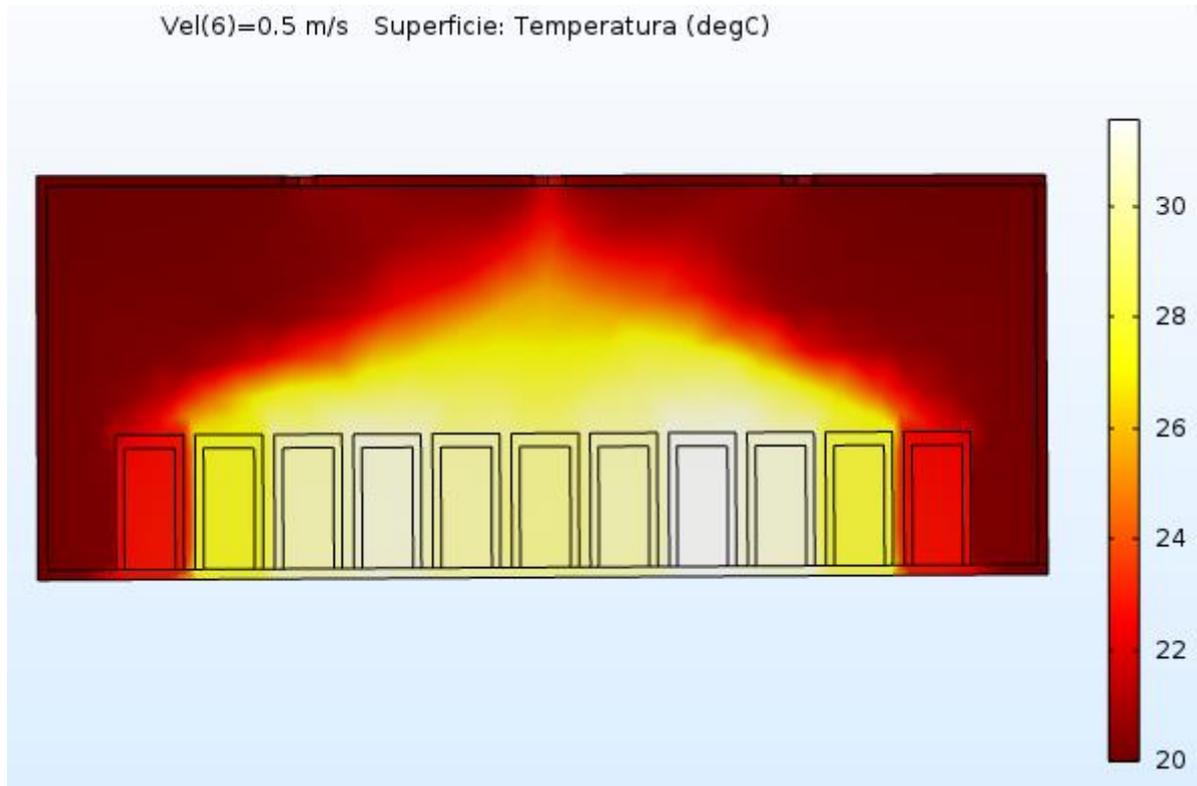


Figura 9.17: Temperatura barrido paramétrico con velocidad de entrada 0,5m/s

En este caso, la temperatura máxima que se alcanza es de 305K(32°C) y la temperatura en los contenedores periféricos es del orden de los 296K(23°C).

9.4.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES CON VELOCIDAD DE ENTRADA DE 0,3 m/s.

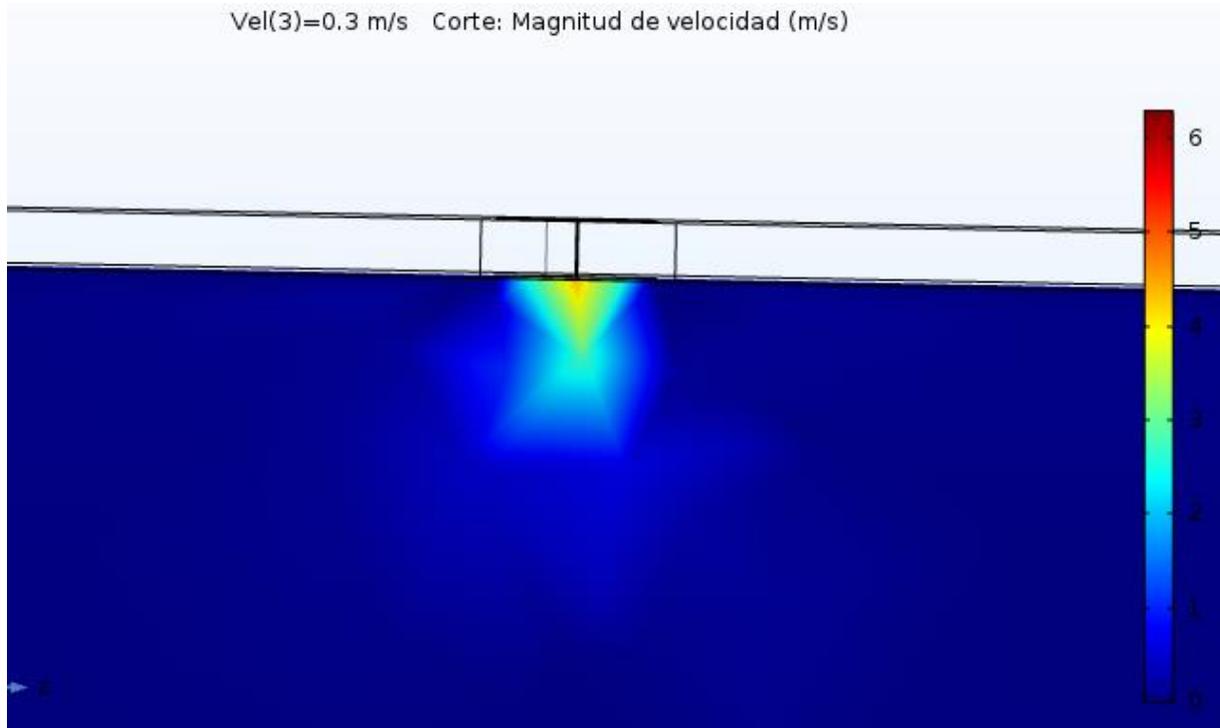


Figura 9.18: Campo de velocidades de salida con ventilador

En la figura 9.18 expuesta anteriormente se muestra la velocidad que se alcanza en el caso de una velocidad de entrada de 0,3 m/s. Se alcanzan velocidades con valores entre 0,5 m/s y 5 m/s en los puntos de mayor magnitud.

10. CONCLUSIONES

10.1 CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN

- Se ha conseguido desarrollar un modelo numérico del almacén de residuos radiactivos que permite visualizar y comparar adecuadamente la distribución de temperaturas y velocidades del aire dentro de dicho almacén.
- La calidad del mallado es media-alta. Esto permite aseverar que los resultados obtenidos son fiables si se obvian otros factores, como la idoneidad de las condiciones iniciales y de contorno asumidas.
- Las simplificaciones hechas facilitan la simulación sin afectar significativamente a la fiabilidad de los resultados.
- De los resultados obtenidos se infiere:
 - Se debe estudiar la posibilidad de adopción de un sistema de ventilación forzada para asegurar una buena refrigeración de los contenedores.
 - El barrido paramétrico realizado permite fijar el caudal de aire a partir del cual la refrigeración de los contenedores no se ve mejorada ostensiblemente.
 - Los contenedores centrales soportan las temperaturas más elevadas debido al calor que les llega de los contenedores contiguos y de que la velocidad del aire es menor en esas zonas.
 - El calor decrece rápidamente con la distancia respecto a la fuente de calor. Por ello, no son necesarios materiales aislantes del calor en las paredes del almacén.
 - A partir de una velocidad de entrada de 0.3m/s la mejora es insignificante (3°C-6°C) con el aumento de la velocidad de entrada (potencia requerida mayor, más gasto).



10.2 MEJORAS

- Trabajar con una geometría más detallada donde se consideren elementos estructurales (cimientos) y no-estructurales (puertas, ventanas, salientes del almacén) que pueden influir en la refrigeración.
- Trabajar con medios computacionales más potentes, que permitan asignar un mallado de mejor calidad y obtener resultados más ajustados.
- Aplicar una física fluido-térmica más precisa, que recoja fenómenos no contemplados (por ejemplo³: radiación y flujo turbulento) y condicionales iniciales y de contorno más ajustadas.

³ vvnvn



11. BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR>
2. http://oa.upm.es/32714/1/PFG_Laura_Garcia_de_Dios.pdf
3. Introduction to Nuclear Engineering
 - a. John R.Lamars
 - b. Antohny J Baratta
 - c. Prentice Hall, 2001
4. <http://www.unet.edu.ve>
5. <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
6. Introducción a la mecánica de fluidos” de Robert W. Fox y Alan T. McDonald, apartado 2.5.2
7. <http://www.enresa.es/>



DOCUMENTO N°2

ANEXOS



ÍNDICE DE ANEXOS

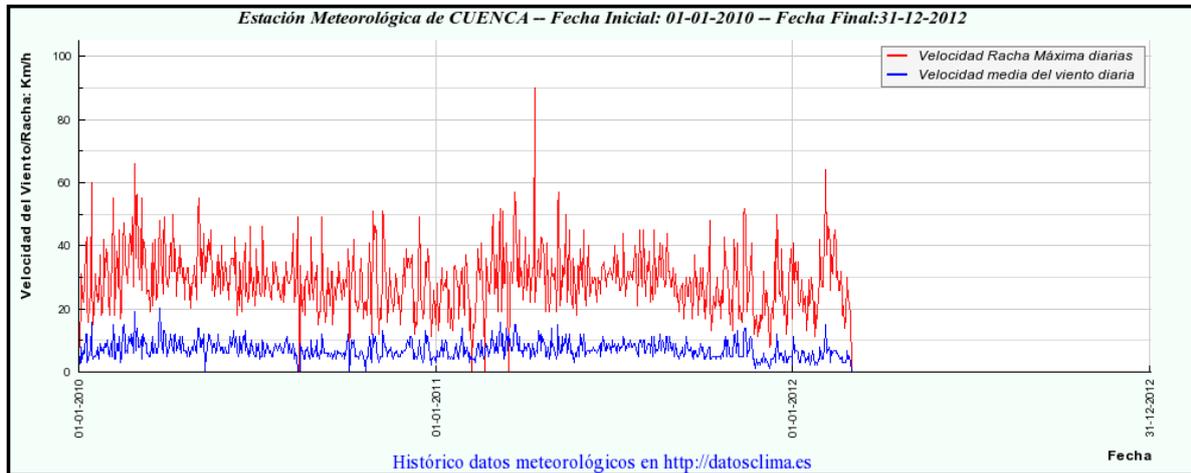
Anexo I: Estadísticas del viento en Cuenta desde 2010-2012.

Fuente:¹¹ <https://datosclima.es/Aemethistorico/Viento.php>



ANEXO I

Datos y gráficos de Viento.



Resumen de Valores de Viento a lo largo del Periodo seleccionado:



VALORES PARA LA ESTACION METEOROLOGICA: CUENCA

FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)	FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)	FECHA	Racha Max (Km/h)	Hora Racha	Veloc. Media (Km/h)
01-01-2010	0		0	22-11-2010	28.08	13:20	8.84	13-10-2011	20.16	16:15	5.04
02-01-2010	15.12	13:55	5.04	23-11-2010	21.96	12:10	5.04	14-10-2011	20.88	19:38	3.96
03-01-2010	16.92	8:25	2.88	24-11-2010	20.88	13:40	5.04	15-10-2011	24.12	8:55	5.04
04-01-2010	30.96	13:50	7.92	25-11-2010	24.12	14:20	5.04	16-10-2011	29.88	19:51	5.04
05-01-2010	24.12	Varías	3.96	26-11-2010	15.12	2:20	5.04	17-10-2011	23.04	9:20	5.04
06-01-2010	21.96	1:18	8.84	27-11-2010	23.04	10:13	8.84	18-10-2011	20.88	12:50	5.04
07-01-2010	28.08	Varías	8.12	28-11-2010	25.92	15:23	8.12	19-10-2011	24.12	15:38	3.96
08-01-2010	39.96	13:42	11.88	29-11-2010	36	20:54	8.84	20-10-2011	16.92	15:22	5.04
09-01-2010	42.84	14:00	11.88	30-11-2010	33.12	0:31	8.84	21-10-2011	25.92	22:48	8.12
10-01-2010	20.88	15:10	2.88	01-12-2010	27	14:05	8.84	22-10-2011	21.96	0:57	5.04
11-01-2010	15.84	13:43	3.96	02-12-2010	38.88	14:01	7.92	23-10-2011	42.84	13:43	9
12-01-2010	20.88	15:10	8.12	03-12-2010	33.12	12:58	10.08	24-10-2011	33.84	13:00	11.16
13-01-2010	25.92	20:56	8.84	04-12-2010	36	21:35	9	25-10-2011	33.12	13:40	5.04
14-01-2010	60.12	8:39	15.84	05-12-2010	33.12	0:45	7.92	26-10-2011	33.12	16:30	10.08
15-01-2010	29.16	2:05	8.12	06-12-2010	33.84	8:17	11.16	27-10-2011	32.04	5:40	10.08
16-01-2010	15.12	5:05	3.96	07-12-2010	34.92	22:04	11.16	28-10-2011	20.88	17:30	8.12
17-01-2010	20.16	15:15	5.04	08-12-2010	37.08	15:24	10.08	29-10-2011	15.12	Varías	5.04
18-01-2010	30.96	11:28	5.04	09-12-2010	15.84	17:35	3.96	30-10-2011	23.04	15:52	5.04
19-01-2010	24.12	16:20	8.12	10-12-2010	21.96	15:01	8.12	31-10-2011	16.92	15:15	5.04
20-01-2010	24.84	14:35	7.92	11-12-2010	11.88	1:03	3.96	01-11-2011	12.96	12:55	5.04
21-01-2010	21.96	13:30	8.12	12-12-2010	15.84	18:24	5.04	02-11-2011	42.12	19:40	11.16
22-01-2010	23.04	0:46	3.96	13-12-2010	15.12	14:10	3.96	03-11-2011	37.08	7:55	11.88
23-01-2010	37.08	12:04	9	14-12-2010	29.16	23:51	8.12	04-11-2011	27	2:20	8.12
24-01-2010	18	19:32	8.84	15-12-2010	48.96	5:59	10.08	05-11-2011	36	13:46	10.08
25-01-2010	19.08	17:31	8.84	16-12-2010	32.04	14:10	8.12	06-11-2011	41.04	14:47	12.96
26-01-2010	28.08	7:52	7.92	17-12-2010	23.04	21:13	8.12	07-11-2011	16.92	Varías	5.04
27-01-2010	42.12	15:50	8.12	18-12-2010	21.96	13:57	5.04	08-11-2011	20.88	12:26	5.04
28-01-2010	29.88	13:51	9	19-12-2010	16.92	15:32	2.88	09-11-2011	16.92	13:32	5.04
29-01-2010	38.88	14:20	7.92	20-12-2010	19.08	11:08	5.04	10-11-2011	15.84	14:28	5.04
30-01-2010	37.08	14:29	10.08	21-12-2010	34.92	14:42	12.96	11-11-2011	21.96	13:43	5.04
31-01-2010	27	12:46	8.12	22-12-2010	34.92	3:28	10.08	12-11-2011	50.04	13:18	11.88
01-02-2010	23.04	19:38	8.12	23-12-2010	29.88	18:05	9	13-11-2011	51.84	11:17	14.04
02-02-2010	18	13:24	5.04	24-12-2010	38.88	14:12	11.16	14-11-2011	47.88	14:50	14.04
03-02-2010	29.16	14:04	9	25-12-2010	34.92	18:57	7.92	15-11-2011	19.08	13:24	5.04
04-02-2010	33.12	23:19	5.04	26-12-2010	21.96	2:05	5.04	16-11-2011	24.84	12:22	8.84
05-02-2010	55.08	10:30	15.12	27-12-2010	11.16	13:30	2.16	17-11-2011	25.92	21:15	8.84
06-02-2010	30.96	13:47	9	28-12-2010	12.96	3:56	3.96	18-11-2011	30.96	12:37	10.08
07-02-2010	18	14:38	3.96	29-12-2010	16.92	18:27	3.96	19-11-2011	33.12	Varías	11.16
08-02-2010	28.08	22:10	3.96	30-12-2010	25.92	10:07	5.04	20-11-2011	41.04	12:34	10.08
09-02-2010	38.16	16:04	9	31-12-2010	19.08	2:10	3.96	21-11-2011	20.16	0:28	3.96
10-02-2010	27	13:28	8.84	01-01-2011	15.12	15:00	2.88	22-11-2011	15.12	12:37	3.96
11-02-2010	45	15:10	11.16	02-01-2011	28.08	23:20	8.84	23-11-2011	11.88	11:08	2.88
12-02-2010	34.92	1:38	10.08	03-01-2011	28.08	0:10	5.04	24-11-2011	15.12	11:10	1.08
13-02-2010	16.92	9:38	2.88	04-01-2011	12.96	12:20	5.04	25-11-2011	18	18:45	3.96
14-02-2010	20.16	23:43	5.04	05-01-2011	18	22:20	5.04	26-11-2011	11.16	13:51	2.16
15-02-2010	41.04	12:38	14.04	06-01-2011	25.92	Varías	7.92	27-11-2011	14.04	14:51	2.88
16-02-2010	47.16	9:27	15.12	07-01-2011	33.12	14:30	8.84	28-11-2011	18	3:57	2.16
17-02-2010	38.88	14:13	9	08-01-2011	29.16	19:20	10.08	29-11-2011	14.04	15:59	2.16
18-02-2010	33.84	13:38	8.12	09-01-2011	25.92	2:00	5.04	30-11-2011	18	14:12	3.96
19-02-2010	33.12	17:26	8.84	10-01-2011	28.08	18:01	7.92	01-12-2011	16.92	14:19	2.88
20-02-2010	28.08	14:48	8.12	11-01-2011	27	12:01	10.08	02-12-2011	32.04	15:21	8.12
21-02-2010	37.08	9:01	11.16	12-01-2011	32.04	2:51	9	03-12-2011	18	3:53	2.88
22-02-2010	43.92	15:48	10.08	13-01-2011	20.88	8:08	3.96	04-12-2011	18	15:10	2.88
23-02-2010	37.08	15:00	9	14-01-2011	15.84	22:03	3.96	05-12-2011	25.92	13:41	3.96
24-02-2010	37.08	11:58	11.88	15-01-2011	25.92	17:44	8.04				



29-04-2010	33.84	16.50	10.08	20-03-2011	28.08	20:52	6.84	01-02-2012	38.88	13:30	6.84
30-04-2010	27	13:45	6.84	21-03-2011	34.92	10:03	9	08-02-2012	25.92	15:53	2.88
01-05-2010	28.08	16:19	6.84	22-03-2011	42.12	10:14	10.08	09-02-2012	25.92	15:53	2.88
02-05-2010	23.04	16:08	6.12	23-03-2011	56.88	16:36	15.12	10-02-2012	37.08	14:50	6.84
03-05-2010	50.04	14:51	14.04	24-03-2011	51.12	11:15	15.12	11-02-2012	30.96	13:40	6.12
04-05-2010	55.08	13:32	14.04	25-03-2011	29.88	10:16	10.08	12-02-2012	42.12	23:20	6.84
05-05-2010	38.88	10:09	7.92	26-03-2011	27	14:59	6.84	13-02-2012	45	0:20	6.84
06-05-2010	28.08	11:10	7.92	27-03-2011	45	14:40	11.16	14-02-2012	38.88	16:10	6.84
07-05-2010	38.88	15:48	10.08	28-03-2011	27	19:59	6.84	15-02-2012	29.88	12:10	6.12
08-05-2010	32.04	12:51	9	29-03-2011	33.12	14:23	6.84	16-02-2012	32.04	9:50	6.12
09-05-2010	43.92	12:33	11.88	30-03-2011	30.96	14:13	6.84	17-02-2012	25.92	13:10	5.04
10-05-2010	29.88	16:27	0	31-03-2011	23.04	17:42	5.04	18-02-2012	25.92	15:00	3.96
11-05-2010	33.12	15:25	6.12	01-04-2011	29.88	13:03	9	19-02-2012	32.04	16:30	3.96
12-05-2010	39.96	12:39	6.84	02-04-2011	28.08	14:26	6.84	20-02-2012	23.04	19:00	5.04
13-05-2010	34.92	17:27	6.84	03-04-2011	42.84	11:15	7.92	21-02-2012	18	14:20	2.88
14-05-2010	42.12	17:40	11.88	04-04-2011	25.92	10:21	6.84	22-02-2012	20.88	16:10	2.88
15-05-2010	37.08	9:15	11.16	05-04-2011	28.08	12:54	9	23-02-2012	14.04	13:00	2.88
16-05-2010	45	15:25	9	06-04-2011	37.08	8:23	9	24-02-2012	16.92	14:30	2.88
17-05-2010	25.92	14:22	7.92	07-04-2011	21.96	15:27	6.12	25-02-2012	29.88	14:50	5.04
18-05-2010	25.92	16:53	6.12	08-04-2011	24.12	14:31	3.96	26-02-2012	28.08	18:10	6.84
19-05-2010	30.96	17:10	9	09-04-2011	27	14:40	5.04	27-02-2012	24.12	10:10	3.96
20-05-2010	24.12	11:43	9	10-04-2011	33.12	23:58	9	28-02-2012	20.16	12:10	5.04
21-05-2010	28.08	9:18	6.12	11-04-2011	33.12	0:00	6.12	29-02-2012	19.08	13:20	2.88
22-05-2010	33.12	23:14	6.84	12-04-2011	90	13:28	5.04	01-03-2012	0		0
23-05-2010	37.08	18:28	11.88	13-04-2011	21.96	11:08	6.12	02-03-2012	0		0
24-05-2010	27	18:36	10.08	14-04-2011	28.08	14:03	6.84	03-03-2012	0		0
25-05-2010	34.92	13:02	9	15-04-2011	32.04	22:28	6.12	04-03-2012	0		0
26-05-2010	24.84	15:22	6.84	16-04-2011	38.88	9:13	12.96	05-03-2012	0		0
27-05-2010	39.96	16:57	7.92	17-04-2011	29.88	15:14	10.08	06-03-2012	0		0
28-05-2010	27	18:32	6.12	18-04-2011	34.92	10:30	11.88	07-03-2012	0		0
29-05-2010	25.92	13:04	7.92	19-04-2011	42.84	15:16	6.84	08-03-2012	0		0
30-05-2010	28.08	10:54	6.12	20-04-2011	42.12	16:53	11.16	09-03-2012	0		0
31-05-2010	34.92	10:48	7.92	21-04-2011	38.88	17:38	10.08	10-03-2012	0		0
01-06-2010	30.96	16:22	6.12	22-04-2011	36	17:13	9	11-03-2012	0		0
02-06-2010	25.92	14:01	6.12	23-04-2011	19.08	17:31	7.92	12-03-2012	0		0
03-06-2010	28.08	14:19	6.12	24-04-2011	20.16	17:21	5.04	13-03-2012	0		0
04-06-2010	23.04	Varías	6.12	25-04-2011	41.04	16:21	5.04	14-03-2012	0		0
05-06-2010	32.04	17:51	11.16	26-04-2011	24.12	19:28	7.92	15-03-2012	0		0
06-06-2010	36	19:21	7.92	27-04-2011	19.08	17:17	3.96	16-03-2012	0		0
07-06-2010	36	13:45	9	28-04-2011	24.12	11:52	6.12	17-03-2012	0		0
08-06-2010	36	13:53	12.96	29-04-2011	36	8:09	14.04	18-03-2012	0		0
09-06-2010	30.96	12:18	7.92	30-04-2011	30.96	18:33	7.92	19-03-2012	0		0
10-06-2010	42.84	16:14	9	01-05-2011	30.96	18:40	9	20-03-2012	0		0
11-06-2010	33.12	11:57	11.16	02-05-2011	29.16	13:07	6.84	21-03-2012	0		0
12-06-2010	18	14:38	6.84	03-05-2011	33.12	18:10	6.12	22-03-2012	0		0
13-06-2010	27	11:27	5.04	04-05-2011	19.08	15:17	3.96	23-03-2012	0		0
14-06-2010	20.88	13:38	6.84	05-05-2011	32.04	12:36	6.12	24-03-2012	0		0
15-06-2010	34.92	15:44	11.16	06-05-2011	51.84	21:53	15.12	25-03-2012	0		0
16-06-2010	29.88	10:43	7.92	07-05-2011	56.88	9:58	7.92	26-03-2012	0		0
17-06-2010	19.08	12:30	6.12	08-05-2011	20.88	10:17	6.12	27-03-2012	0		0
18-06-2010	33.12	17:50	11.16	09-05-2011	24.12	20:15	6.12	28-03-2012	0		0
19-06-2010	36	13:32	10.08	10-05-2011	33.84	14:18	11.16	29-03-2012	0		0
20-06-2010	41.04	8:25	12.96	11-05-2011	27	17:12	6.84	30-03-2012	0		0
21-06-2010	24.12	16:34	6.84	12-05-2011	33.12	18:07	9	31-03-2012	0		0
22-06-2010	28.08	13:39	9	13-05-2011	30.96	13:45	9	01-04-2012	0		0
23-06-2010	21.96	16:03	6.12	14-05-2011	50.04	17:52	11.88	02-04-2012	0		0
24-06-2010	24.12	22:09	5.04	15-05-2011	21.96	13:07	6.12	03-04-2012	0		0
25-06-2010	46.08	18:20	9	16-05-2011	29.16	9:17	7.92	04-04-2012	0		0
26-06-2010	28.08	0:34	6.12	17-05-2011	29.16	10:20	9	05-04-2012	0		0



24-09-2010	34.92	15:10	6.12	15-08-2011	33.12	13:50	6.84	07-07-2012	0	0
25-09-2010	29.16	15:51	6.12	16-08-2011	27	14:50	6.84	08-07-2012	0	0
26-09-2010	27	11:20	6.12	17-08-2011	33.12	22:40	7.92	07-07-2012	0	0
27-09-2010	23.04	13:15	5.04	18-08-2011	41.04	Varias	11.88	08-07-2012	0	0
28-09-2010	29.16	13:28	6.12	19-08-2011	29.88	Varias	6.84	09-07-2012	0	0
29-09-2010	24.12	12:34	6.12	20-08-2011	32.04	14:05	9	10-07-2012	0	0
30-09-2010	27	14:30	3.96	21-08-2011	39.96	18:27	10.08	11-07-2012	0	0
01-10-2010	29.16	12:20	6.12	22-08-2011	30.96	14:53	9	12-07-2012	0	0
02-10-2010	27	14:15	7.92	23-08-2011	27	15:25	6.12	13-07-2012	0	0
03-10-2010	38.88	21:37	11.88	24-08-2011	28.08	Varias	7.92	14-07-2012	0	0
04-10-2010	32.04	3:13	6.84	25-08-2011	34.92	16:54	11.16	15-07-2012	0	0
05-10-2010	0	0	0	26-08-2011	43.92	13:13	11.16	16-07-2012	0	0
06-10-2010	20.88	14:10	3.96	27-08-2011	32.04	19:12	6.84	17-07-2012	0	0
07-10-2010	30.96	18:45	10.08	28-08-2011	32.04	7:45	11.16	18-07-2012	0	0
08-10-2010	32.04	22:50	9	29-08-2011	27	13:32	7.92	19-07-2012	0	0
09-10-2010	42.12	14:18	10.08	30-08-2011	27	14:39	6.84	20-07-2012	0	0
10-10-2010	21.96	17:25	5.04	31-08-2011	27	15:32	6.84	21-07-2012	0	0
11-10-2010	23.04	15:20	6.12	01-09-2011	33.12	12:14	9	22-07-2012	0	0
12-10-2010	21.96	12:20	5.04	02-09-2011	24.12	16:24	5.04	23-07-2012	0	0
13-10-2010	19.08	13:31	5.04	03-09-2011	30.96	Varias	9	24-07-2012	0	0
14-10-2010	20.88	13:47	3.96	04-09-2011	24.12	14:59	6.12	25-07-2012	0	0
15-10-2010	24.12	13:38	6.12	05-09-2011	23.04	21:08	5.04	26-07-2012	0	0
16-10-2010	29.16	11:11	6.12	06-09-2011	24.84	8:41	5.04	27-07-2012	0	0
17-10-2010	36	14:59	6.84	07-09-2011	19.08	15:16	3.96	28-07-2012	0	0
18-10-2010	27	13:25	6.12	08-09-2011	25.92	15:15	6.12	29-07-2012	0	0
19-10-2010	16.92	6:06	5.04	09-09-2011	27	13:09	6.12	30-07-2012	0	0
20-10-2010	21.96	15:12	2.88	10-09-2011	28.08	13:42	7.92	31-07-2012	0	0
21-10-2010	21.96	11:37	0	11-09-2011	25.92	12:49	6.84	01-08-2012	0	0
22-10-2010	20.16	13:37	2.88	12-09-2011	16.92	14:25	5.04	02-08-2012	0	0
23-10-2010	18	13:14	5.04	13-09-2011	24.84	Varias	6.12	03-08-2012	0	0
24-10-2010	28.08	14:45	5.04	14-09-2011	29.88	Varias	11.16	04-08-2012	0	0
25-10-2010	41.04	14:07	11.16	15-09-2011	24.12	23:10	7.92	05-08-2012	0	0
26-10-2010	29.16	12:28	9	16-09-2011	24.12	0:35	6.84	06-08-2012	0	0
27-10-2010	24.12	14:16	5.04	17-09-2011	25.92	13:37	6.84	07-08-2012	0	0
28-10-2010	11.88	10:39	2.88	18-09-2011	29.88	16:13	6.84	08-08-2012	0	0
29-10-2010	51.12	19:10	11.88	19-09-2011	27	13:21	7.92	09-08-2012	0	0
30-10-2010	42.12	19:14	9	20-09-2011	16.92	17:44	5.04	10-08-2012	0	0
31-10-2010	46.08	15:02	11.16	21-09-2011	24.84	14:45	6.84	11-08-2012	0	0
01-11-2010	43.92	15:06	7.92	22-09-2011	21.96	14:29	3.96	12-08-2012	0	0
02-11-2010	33.84	10:31	6.84	23-09-2011	37.08	18:29	6.84	13-08-2012	0	0
03-11-2010	21.96	12:38	5.04	24-09-2011	27	11:51	6.84	14-08-2012	0	0
04-11-2010	11.88	11:53	2.88	25-09-2011	29.88	15:08	5.04	15-08-2012	0	0
05-11-2010	20.16	10:24	5.04	26-09-2011	18	Varias	5.04	16-08-2012	0	0
06-11-2010	16.92	14:31	5.04	27-09-2011	28.08	14:14	6.12	17-08-2012	0	0
07-11-2010	32.04	15:00	5.04	28-09-2011	23.04	12:27	6.12	18-08-2012	0	0
08-11-2010	51.12	21:07	12.96	29-09-2011	33.12	13:49	9	19-08-2012	0	0
09-11-2010	48.96	14:16	10.08	30-09-2011	24.12	Varias	6.84	20-08-2012	0	0
10-11-2010	34.92	9:42	7.92	01-10-2011	33.12	15:04	7.92	21-08-2012	0	0
11-11-2010	28.08	12:23	7.92	02-10-2011	19.08	11:12	3.96	22-08-2012	0	0
12-11-2010	18	2:54	5.04	03-10-2011	23.04	20:05	5.04	23-08-2012	0	0
13-11-2010	15.84	11:32	5.04	04-10-2011	16.92	16:59	3.96	24-08-2012	0	0
14-11-2010	20.88	20:55	6.84	05-10-2011	24.12	16:43	5.04	25-08-2012	0	0
15-11-2010	33.12	12:32	6.84	06-10-2011	30.96	15:41	6.84	26-08-2012	0	0
16-11-2010	24.84	14:35	7.92	07-10-2011	32.04	19:15	7.92	27-08-2012	0	0
17-11-2010	21.96	15:08	5.04	08-10-2011	47.88	4:52	7.92	28-08-2012	0	0
18-11-2010	20.88	13:10	5.04	09-10-2011	23.04	0:25	3.96	29-08-2012	0	0
19-11-2010	19.08	9:00	3.96	10-10-2011	12.96	14:14	3.96	30-08-2012	0	0
20-11-2010	21.96	8:30	6.12	11-10-2011	18	14:16	5.04	31-08-2012	0	0
21-11-2010	30.96	15:20	6.12	12-10-2011	24.12	13:52	5.04			



DOCUMENTO N°3

PLANOS

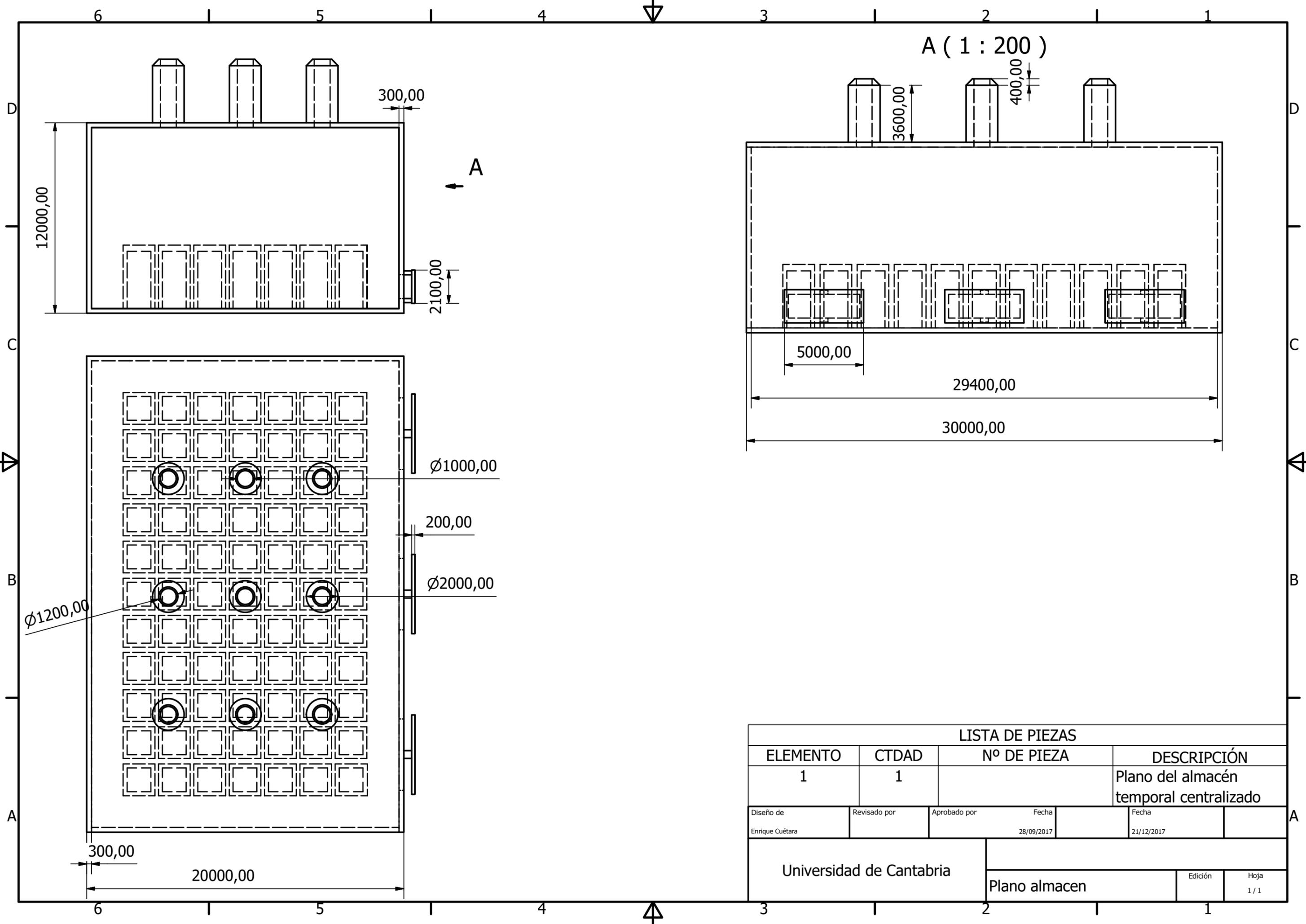


Índice documento nº3:

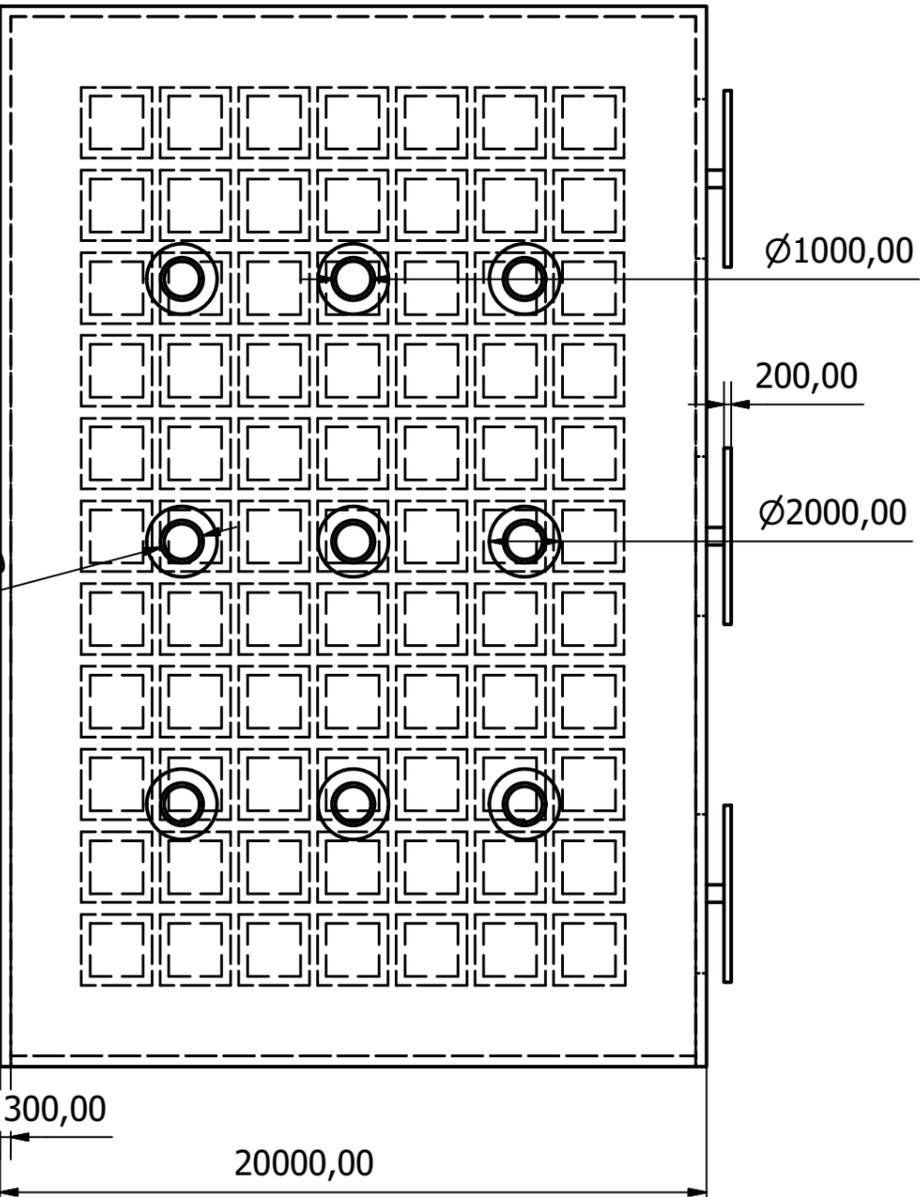
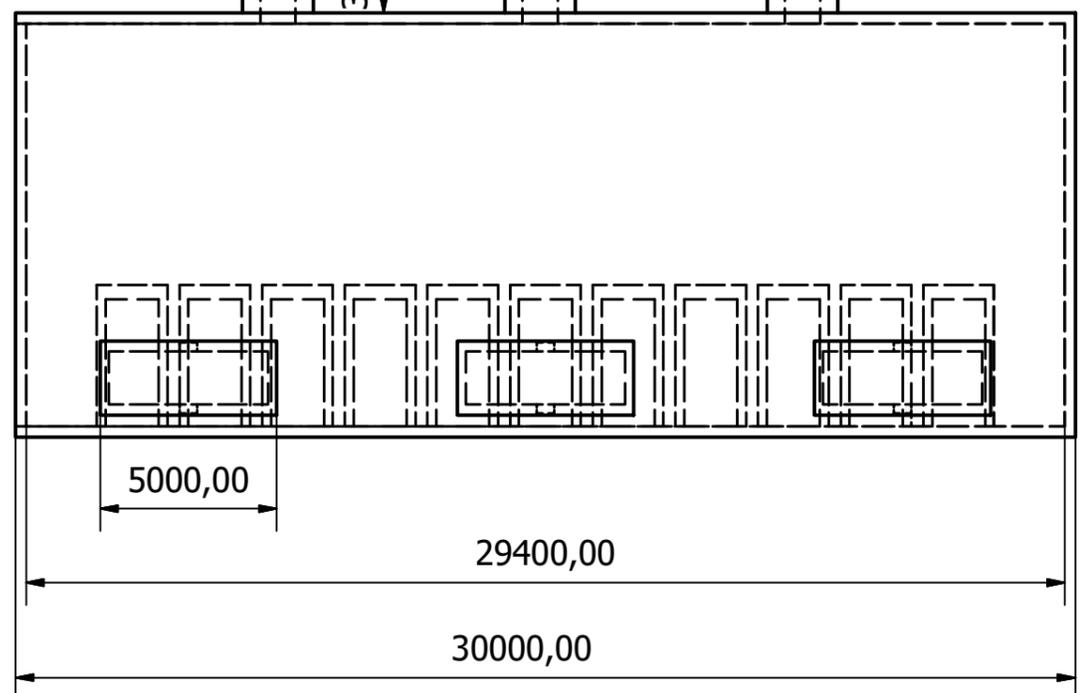
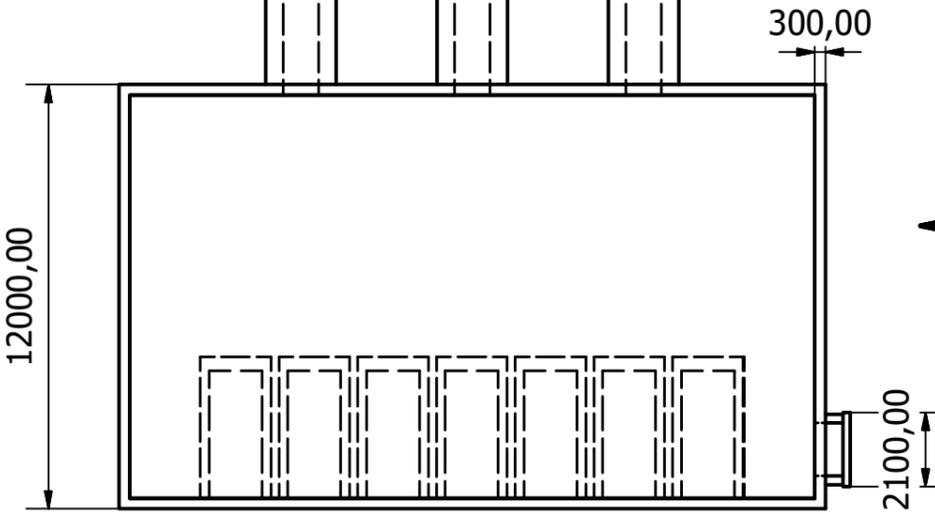
PLANO Nº1: Vistas 1 (Almacén)

PLANO Nº2: Vistas 2 (Contenedores)

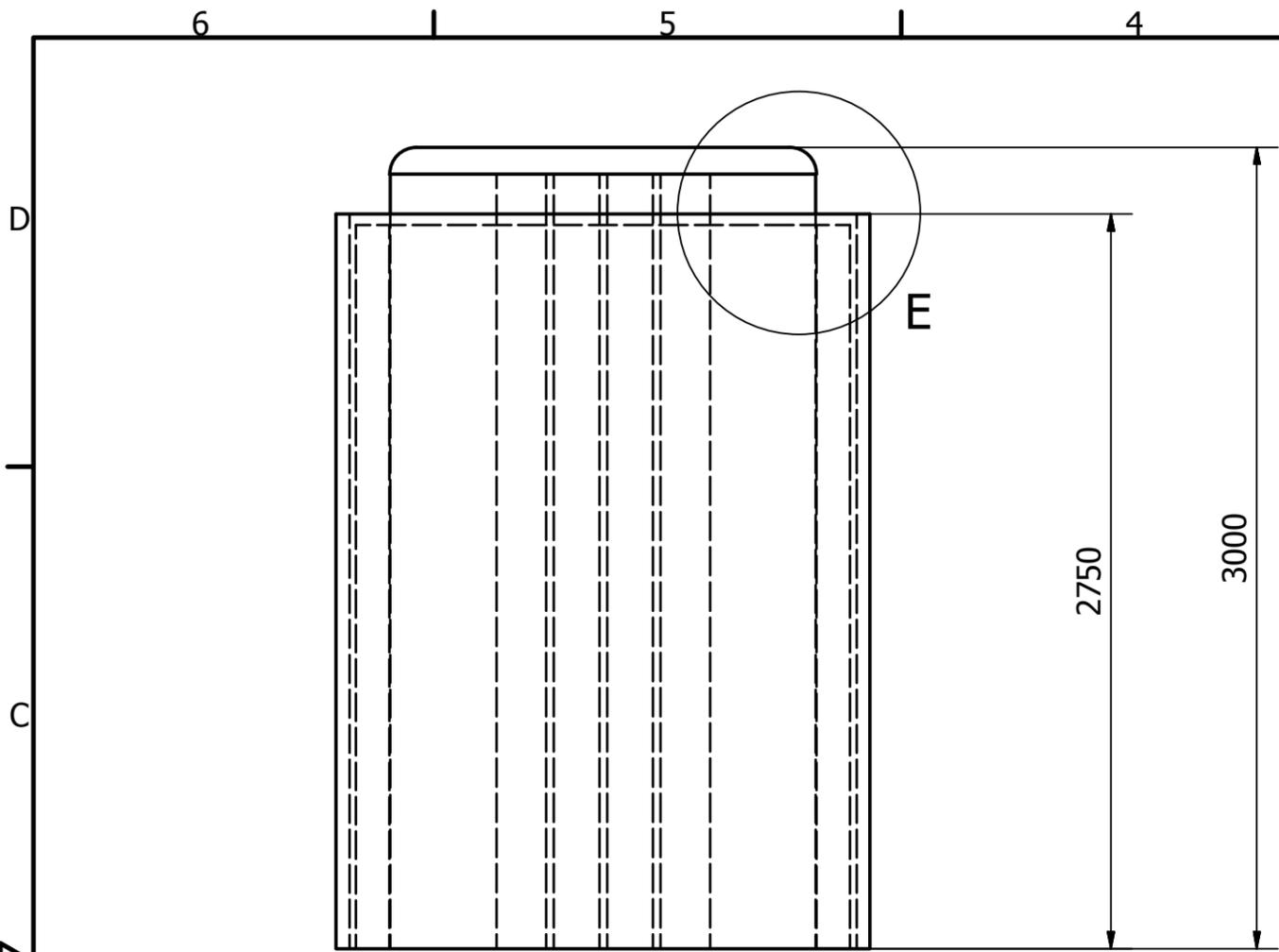




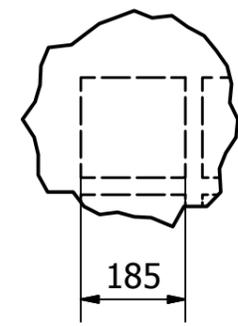
A (1 : 200)



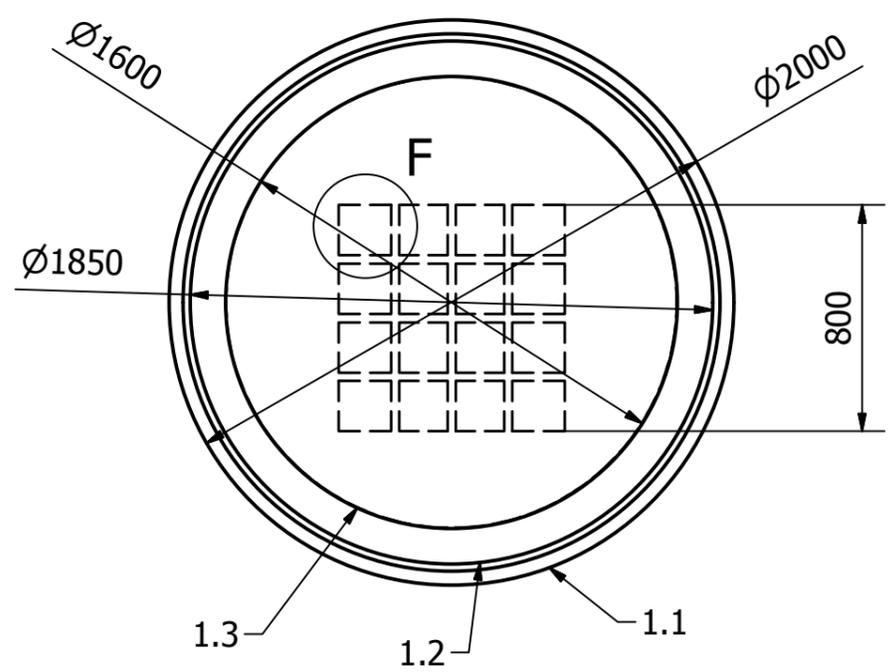
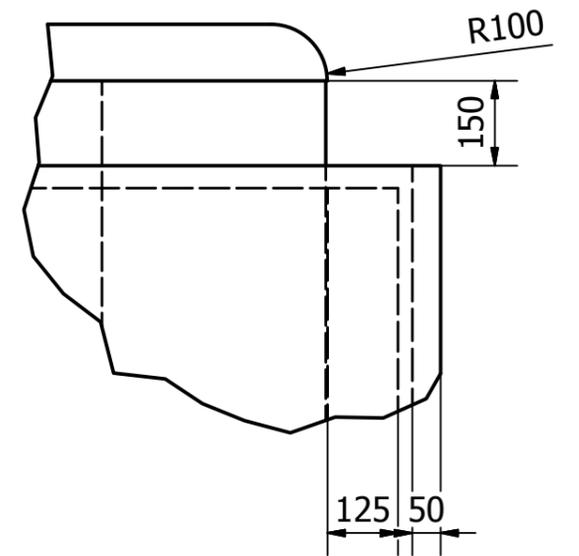
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	1		Plano del almacén temporal centralizado	
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
Enrique Cuétara			28/09/2017	21/12/2017
Universidad de Cantabria		Plano almacen		
		Edición	Hoja	
			1 / 1	



F (0,08 : 1)



E (0,08 : 1)



LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
1	1	Contenedor de Residuos	Aluminio	Almacén de combustible nuclear gastado
1.1	-		Aluminio	Material ligero y resistente a la corrosión
1.2	-		Mecanizado de Aluminio	
1.3	-		Acero inoxidable	Elevada resistencia a la corrosión
Diseño de Enrique Cuétara		Revisado por	Aprobado por	Fecha
			28/09/2017	
Universidad de Cantabria			Contenedor de Residuos	Edición
				Hoja 1 / 1