



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a mi tutor por ayudarme a enfocar el trabajo hacia dónde realmente quiero llegar.

Al consorcio provincial de bomberos de valencia por ayudarme a realizar el trabajo.

A mi familia y a mi pareja por todo su apoyo incondicional.

Y sobre todo a mi padre, por haber sido siempre y seguir siendo mi referente en mi camino.



## **RESUMEN**

El Backdraft consiste en la reactivación de un incendio confinado, el cual estaba falto de comburente y se le aporta una fuente suficiente para alcanzar el límite superior de inflamabilidad, provocando una bola de fuego consecuencia de una deflagración en el interior del recinto. Esta situación puede generar graves accidentes en incendios que aparentemente estaban apagados. En ese contexto, en este trabajo se pretende mediante el uso de las nuevas tecnologías de diseño y simulación, analizar este fenómeno de combustión en recintos confinados denominado Backdraft, para estudiar su comportamiento, su potencia y su peligrosidad, con la finalidad de encontrar medidas preventivas tanto de detección como de extinción.

**Palabras Clave:** Backdraft, CFD, Simulación de incendios

## RESUM

El Backdraft consisteix en la reanimació de un incendi confinat, el qual estava mancat de comburent i se li aporta una font suficient com per arribar el límit superior de inflamabilitat, provocant una bola de foc a conseqüència de una deflagració en el interior del recinte. Aquesta situació pot generar accidents graus als incendis que aparentment estaven apagats. En aquest context, en aquest treball es pretén mitjançant l'ús de les noves tecnologies de disseny i simulació, analitzar aquest fenomen de combustió en recintes confinats denominat Backdraft, per a estudiar el seu comportament, la seua potencia i perillositat, amb la finalitat de trobar mides preventives tant de detecció com de extinció.

**Paraules Clau:** Backdraft, CFD, Simulació d'Incendis

## **ABSTRACT**

Backdraft phenomena consist on the revival of a confined fire, which was devoid of oxidizer and a source of fresh air is provided, reaching the upper limit of flammability, causing a fireball resulting from a deflagration inside the enclosure. This situation can lead to serious fire accidents that would were apparently extinguished. In this context, the aim of this work is to analyze that combustion phenomena in confined spaces called Backdraft, through the use of new design and simulation technologies to study its behavior, its potential and its dangerousness, in order to find preventive measures both detection and extinction.

**Keywords:** Backdraft, CFD, Fire simulation





## **INDICE GENERAL**

- DOCUMENTO 1. MEMORIA
- DOCUMENTO 2. PRESUPUESTO
- DOCUMENTO 3. PLANOS

## ÍNDICE GENERAL

### DOCUMENTO 1. MEMORIA

<b>Capítulo 1. Objetivo y justificación del TFG</b> .....	5
1.1. OBJETIVOS .....	5
1.2. MOTIVACIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL TFG .....	5
<b>Capítulo 2. El Fenómeno Backdraft</b> .....	6
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. EL TRIÁNGULO DEL FUEGO.....	6
2.3. INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO BACKDRAFT.....	8
2.4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....	9
2.4.1. QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN.....	9
2.4.2. ESTEQUIOMETRIA DE LA COMBUSTIÓN.....	12
2.4.3. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD.....	14
2.4.4. LLAMA DE DIFUSIÓN Y LLAMA DE PRE-MEZCLA .....	15
2.4.5. CORRIENTE DE GRAVEDAD.....	16
2.5. EXPLICACIÓN TÉCNICA DEL FENÓMENO BACKDRAFT.....	16
<b>Capítulo 3. Simulación numérica del fenómeno Backdraft</b> .....	17
3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL BACKDRAFT .....	17
3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTO.....	17
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	19
3.3.1. TIEMPOS DE IGNICIÓN .....	19
3.3.2. VISUALIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE GRAVEDAD Y EL BACKDRAFT .....	19
3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO .....	20
3.4.1. RESULTADOS DE CAUDAL DE GAS INFLAMABLE .....	20
3.4.2. RESULTADOS DE TIEMPOS DE IGNICIÓN.....	20
3.5. INTRODUCCIÓN AL CFD.....	21
3.6. SELECCIÓN DEL PROGRAMA UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN.....	22
3.7. MODELOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN.....	23
3.7.1. MODELO DE TURBULENCIA.....	23
3.7.2. MODELO DE COMBUSTIÓN .....	23
3.8. REALIZACIÓN DEL MODELO.....	24

3.8.1. GEOMETRÍA DEL MODELO .....	24
3.8.2. MALLADO DEL MODELO .....	25
3.8.3. SET UP DEL MODELO EN CFX 17.0.....	26
3.9. COMPARACIÓN DEL MODELO VIRTUAL Y EL EXPERIMENTO REALIZADO .....	28
3.9.1. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE IGNICIÓN .....	28
3.9.2. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE GRAVEDAD.....	30
3.9.3. VISUALIZACIÓN DE LA IGNICIÓN .....	34
3.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
3.11. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN .....	43
<b>Capítulo 4. Aplicaciones del modelo virtual en ingeniería de protección contra incendios.....</b>	<b>44</b>
4.1. INTRODUCCIÓN DE LAS APLICACIONES.....	44
4.2. FIN ANALÍTICO: VISUALIZACIÓN DEL FENÓMENO BACKDRAFT .....	44
4.3. DISEÑO DE SEGURIDAD PREVENTIVA.....	49
4.4. DISEÑO DE SEGURIDAD CURATIVA. ....	51
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>DOCUMENTO 2. PRESUPUESTO</b>	
<b>Capítulo 1. Presupuestos y mediciones .....</b>	<b>60</b>
1.1. Justificación de precios personal.....	60
1.2. Justificación de costes de materiales .....	61
1.3. Justificación de costes generales .....	62
1.4. Presupuesto de ejecución material.....	63
1.5. Resumen de presupuesto.....	63
<b>DOCUMENTO 3. PLANOS</b>	
<b>Capítulo 1. Planos</b>	
1. Plano 1. Acuario de Laboratorio de Bomberos .....	65
2. Plano 2. Contenedor de Incendios de Bomberos .....	66
3. Plano 3. Contenedor de Incendios de Bomberos. Diseño de ventilación .....	67
4. Plano 4. Contenedor de Incendios de Bomberos. Apertura Superior .....	68

**INDICE DE FIGURAS DE LA MEMORIA**

Figura 1. Triángulo del fuego (Fuente [ 17])..... 6

Figura 2. Triángulo del fuego sin comburente (Fuente [ 17]) ..... 7

Figura 3. Recinto confinado con una combustión incompleta en una vivienda (Fuente [ 6]) ..... 8

Figura 4. Bola de fuego a causa del Backdraft (Fuente [ 6])..... 9

Figura 5. Energía de activación (Fuente[ 18])..... 10

Figura 6. Rotura de enlaces debido a la energía de activación (Fuente: propia)..... 10

Figura 7. Redistribución de las moléculas formando nuevos compuestos de transición (Fuente: propia)  
..... 11

Figura 8. Redistribución de las moléculas formando los productos de la combustión (Fuente: propia)  
..... 11

Figura 9. Pecera de laboratorio para bomberos en el parque de bomberos de Chiva. (Fuente: propia)  
..... 17

Figura 10. Cámara térmica Dräger UCF 8000. (Fuente: propia)..... 18

Figura 11. Gráfico de la concentración de butano en % de volumen frente al tiempo de ignición en segundos (Fuente: propia) ..... 21

Figura 12. Pecera modelada por ordenador. (Fuente: propia) ..... 24

Figura 13. Modelo virtual de CFD en ANSYS. (Fuente: propia) ..... 25

Figura 14. Mallado tridimensional generado para la simulación CFD. (Fuente: propia) ..... 26

Figura 15. Momento de la ignición del modelo CFD (fracción molar vs. timestep). (Fuente: propia).. 29

Figura 16. Plano de la puerta en el segundo 0 (Concentración de butano). (Fuente: propia)..... 31

Figura 17. Plano de la puerta en el segundo 1,512 (Concentración de butano). (Fuente: propia)..... 31

Figura 18. Imagen de la cámara térmica en el momento que se abre la puerta del experimento 1. (Fuente: propia)..... 32

Figura 19. Plano de la puerta en el segundo 4,872 (Concentración de butano). (Fuente: propia)..... 32

Figura 20. Imagen de la cámara térmica en el segundo 29. (Fuente: propia) ..... 33

Figura 21. Plano de la puerta en el segundo 16,674 (Concentración de butano). (Fuente: propia)..... 33

Figura 22. Imagen de la cámara de vídeo en el experimento 4, momento de la deflagración. (Fuente: propia) ..... 34

Figura 23. Concentración CO<sub>2</sub> en el segundo 16,716. (Fuente: propia) ..... 34

Figura 24. Concentración CO<sub>2</sub> en el segundo 16,758. (Fuente: propia) ..... 35

Figura 25. Concentración CO<sub>2</sub> en el segundo 16,8. (Fuente: propia) ..... 35

Figura 26. Concentración CO<sub>2</sub> en el segundo 16,842. (Fuente: propia) ..... 36

Figura 27. Concentración CO2 en el segundo 17,094. (Fuente: propia) .....	36
Figura 28. Plano de la puerta en el segundo 17,094 (Temperatura), momento del Backdraft. (Fuente: propia) .....	36
Figura 29. Imagen del Backdraft del experimento 1 (segundo 70). (Fuente: propia) .....	37
Figura 30. Imagen del Backdraft del experimento 1 (segundo 70,5). (Fuente: propia) .....	37
Figura 31. Imagen del experimento 4 en el momento del Backdraft. (Fuente: propia) .....	38
Figura 32. Plano de la fuente de ignición en el segundo 1.512 (Temperatura). (Fuente: propia) .....	38
Figura 33. Plano de la puerta en el segundo 16,674 (Temperatura). (Fuente: propia) .....	39
Figura 34. Presión en el interior de la pecera en el segundo 15,036. (Fuente: propia) .....	39
Figura 35. Presión en el sistema en el segundo 16,842. (Fuente: propia) .....	40
Figura 36. Velocidad del modelo en el segundo 15,036. (Fuente: propia) .....	40
Figura 37. Velocidad del modelo en el segundo 16,842. (Fuente: propia) .....	41
Figura 38. Temperatura del modelo en el segundo 15,036 en el plano de la puerta y de la fuente de ignición. (Fuente: propia) .....	41
Figura 39. Temperatura del modelo en el segundo 16,842 en el plano de la puerta y de la fuente de ignición. (Fuente: propia) .....	42
Figura 40. Plano de la puerta en el segundo 17,094 (Temperatura), momento del Backdraft. (Fuente: propia) .....	42
Figura 41. Simulación real de Backdraft en un incendio en recinto confinado. (Fuente: Consorcio Provincial de Bomberos) .....	44
Figura 42. Bola de humo a consecuencia del Backdraft. (Fuente: Consorcio Provincial de Bomberos) .....	45
Figura 43. Corriente de gravedad en simulación CFD (temperatura) de bomberos. (Fuente: propia) .....	46
Figura 44. Corriente de gravedad en simulación CFD (velocidad). (Fuente: propia) .....	46
Figura 45. Velocidad en el interior del contenedor durante la corriente de gravedad. (Fuente: propia) .....	47
Figura 46. Densidad en el interior del contenedor durante la corriente de gravedad. (Fuente: propia) .....	47
Figura 47. Backdraft simulado por CFD. (Fuente: propia) .....	48
Figura 48. Velocidad en el momento del Backdraft. (Fuente: propia) .....	48
Figura 49. Presión en el momento del Backdraft. (Fuente: propia) .....	49
Figura 50. Diseño de los huecos de ventilación en el contenedor. (Fuente: propia) .....	50
Figura 51. Fuga de metano formando una columna de fuego (1,918 s). (Fuente: propia) .....	50
Figura 52. Sistema de apertura de huecos en recinto confinado (20,016 s). (Fuente: propia) .....	51

Figura 53. Diseño de maniobra de intervención en situación de Backdraft. (Fuente: propia) .....	52
Figura 54. Simulación de maniobra de intervención (Temperatura, 0.182 s). (Fuente: propia) .....	52
Figura 55. Simulación maniobra de intervención (densidad, 15.012 s). (Fuente: propia) .....	53
Figura 56. Simulación maniobra de intervención en el interior del contenedor (densidad, 15.012 s). (Fuente: propia).....	53
Figura 57. Simulación maniobra de intervención (velocidad, 15.012 s). (Fuente: propia) .....	54
Figura 58. Simulación maniobra de intervención en el interior del contenedor (velocidad, 15.012 s). (Fuente: propia).....	54
Figura 59. Simulación maniobra de intervención (Oxígeno, 15.012 s). (Fuente: propia) .....	55
Figura 60. Simulación del Backdraft en el contenedor (Oxígeno, 15.012 s). (Fuente: propia) .....	55

**INDICE DE TABLAS DE LA MEMORIA**

Tabla 1. Energía de enlaces (Fuente [ 22]) .....	12
Tabla 2. Rango de inflamabilidad de distintas sustancias en el aire (Fuente [ 21]) .....	15
Tabla 3. Caudal de gas butano a la pecera (Fuente: propia).....	20
Tabla 4. Tiempos de ignición (Fuente: propia).....	20
Tabla 5. Validación de tiempos de ignición. (Fuente: propia).....	30





# **DOCUMENTO 1**

## **MEMORIA DEL TFG**



## ÍNDICE

<b>Capítulo 1. Objetivo y justificación del TFG</b> .....	5
1.1. OBJETIVOS .....	5
1.2. MOTIVACIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL TFG .....	5
<b>Capítulo 2. El Fenómeno Backdraft</b> .....	6
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. EL TRIÁNGULO DEL FUEGO.....	6
2.3. INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO BACKDRAFT.....	8
2.4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....	9
2.4.1. QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN .....	9
2.4.2. ESTEQUIOMETRIA DE LA COMBUSTIÓN.....	12
2.4.3. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD.....	14
2.4.4. LLAMA DE DIFUSIÓN Y LLAMA DE PRE-MEZCLA .....	15
2.4.5. CORRIENTE DE GRAVEDAD .....	16
2.5. EXPLICACIÓN TÉCNICA DEL FENÓMENO BACKDRAFT.....	16
<b>Capítulo 3. Simulación numérica del fenómeno Backdraft</b> .....	17
3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL BACKDRAFT .....	17
3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTO.....	17
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	19
3.3.1. TIEMPOS DE IGNICIÓN .....	19
3.3.2. VISUALIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE GRAVEDAD Y EL BACKDRAFT .....	19
3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO .....	20
3.4.1. RESULTADOS DE CAUDAL DE GAS INFLAMABLE .....	20
3.4.2. RESULTADOS DE TIEMPOS DE IGNICIÓN.....	20
3.5. INTRODUCCIÓN AL CFD.....	21
3.6. SELECCIÓN DEL PROGRAMA UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN.....	22
3.7. MODELOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN.....	23
3.7.1. MODELO DE TURBULENCIA .....	23
3.7.2. MODELO DE COMBUSTIÓN .....	23
3.8. REALIZACIÓN DEL MODELO.....	24
3.8.1. GEOMETRÍA DEL MODELO .....	24

3.8.2. MALLADO DEL MODELO.....	25
3.8.3. SET UP DEL MODELO EN CFX 17.0.....	26
3.9. COMPARACIÓN DEL MODELO VIRTUAL Y EL EXPERIMENTO REALIZADO.....	28
3.9.1. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE IGNICIÓN .....	28
3.9.2. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE GRAVEDAD.....	30
3.9.3. VISUALIZACIÓN DE LA IGNICIÓN .....	34
3.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
3.11. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN .....	43
<b>Capítulo 4. Aplicaciones del modelo virtual en ingeniería de protección contra incendios.....</b>	<b>44</b>
4.1. INTRODUCCIÓN DE LAS APLICACIONES.....	44
4.2. FIN ANALÍTICO: VISUALIZACIÓN DEL FENÓMENO BACKDRAFT .....	44
4.3. DISEÑO DE SEGURIDAD PREVENTIVA.....	49
4.4. DISEÑO DE SEGURIDAD CURATIVA. ....	51
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>58</b>

# Capítulo 1. Objetivo y justificación del TFG

## 1.1. OBJETIVOS

En el campo de la ingeniería de protección contra incendios, el fenómeno Backdraft es uno de los más complejos y difíciles de tratar. Este fenómeno lleva siendo estudiado muchos años y continúa siendo enigmático en ciertos aspectos, ante todo por la aleatoriedad de la que dispone que suceda la deflagración o que no suceda. Si a todo esto se suma la peligrosidad que supone, incluso en situaciones bajo control y realizadas por profesionales, el estudio de su comportamiento se dificulta en magnitudes mayores.

En proyectos de ingeniería, cada vez más se utilizan programas de simulaciones para afrontar problemas que, o bien serían muy costosos de realizar por su gran envergadura, o que por su complejidad se deben realizar virtualmente. Existen distintas herramientas de simulación, y prácticamente todas ellas conllevan que realizar un proyecto sea mucho más llevadero logística y económicamente.

Para este proyecto, el objetivo principal es realizar un modelo tridimensional y simular el fenómeno Backdraft con herramientas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). De esta manera se puede visualizar toda la dinámica de fluidos intrínseca en dicho fenómeno, lo que permite una mayor comprensión de qué sucede, cuándo y cómo.

De esa manera, se lleva a cabo una comparación del modelo mediante un experimento controlado, realizado en un acuario de laboratorio de bomberos, en el cual se pueden tomar medidas de las variables de las que depende dicho modelo.

Las herramientas de simulación, permiten realizar diseños virtuales de una manera rápida y poco costosa. Una vez conseguido un modelo que se asemeje al comportamiento real, se pretende utilizar las herramientas de simulación con el fin de estudiar diseños y geometrías de edificaciones en las cuales se prevea el fenómeno Backdraft para que no se pueda llegar a provocar.

A su vez, se pretende utilizar los programas de simulación para proponer intervenciones más efectivas y cautelosas frente a una posible situación de Backdraft, donde se evite que suceda y que las dotaciones de intervención sufran lesiones.

## 1.2. MOTIVACIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL TFG

El Backdraft es un concepto muy serio, ya que se puede tomar vidas y hay incontables accidentes documentados de este fenómeno físico-químico de combustión. Aunque se han realizado estudios sobre el fenómeno, el uso de nuevas tecnologías como la de simulaciones numéricas puede realmente ayudar a profundizar en el fenómeno de combustión y a proponer medidas útiles para combatirlo.

La justificación del TFG se enfoca, por tanto, a proporcionar la información obtenida mediante herramientas de simulación CFD del fenómeno Backdraft, así como propuestas de medidas preventivas y curativas para combatir dicho suceso.

En adición, la se justifica de forma académica la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado ya que representa la última etapa de los estudios de Grado de ingeniería química realizados por el autor.

## Capítulo 2. El Fenómeno Backdraft

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Los incendios en recintos confinados, es decir, sin un flujo estable de material comburente, son muy frecuentes en zonas urbanas. Un pequeño fuego puede evolucionar y descontrolarse en cuestión de segundos, y uno de los consejos que se da en incendios de vivienda es la compartimentación, a saber: aislar en la mayor de sus posibilidades el fuego provocado, minimizando de ese modo su poder destructivo.

La compartimentación es una buena solución a un pequeño fuego que se ha descontrolado antes de poder extinguirlo. Es una manera muy efectiva de atacar al fuego de manera pasiva, cortando el triángulo del fuego. Pero puede tener malas consecuencias si no se sabe cómo tratar un incendio extinguido de dicha manera.

### 2.2. EL TRIÁNGULO DEL FUEGO

Previamente a la introducción del fenómeno Backdraft, se considera constructivo comentar básicamente los principios químicos que componen una reacción de combustión genérica.

La teoría del triángulo del fuego es una manera simple y gráfica para divulgar la reacción química que se lleva a cabo en una combustión.



Figura 1. Triángulo del fuego (Fuente [ 17])

Para que una combustión tenga lugar, se debe disponer de los tres lados del triángulo, y con que uno de los lados falte, la combustión no podrá tener lugar. De esa manera se comprende que combustible y comburente no son suficientes para crear una reacción de combustión, pues si no superan la temperatura de auto ignición o se les aporta una energía de activación, la reacción no sucederá de manera espontánea; o bien, un combustible no prenderá fuego por el hecho de tener un iniciador si no hay presencia de material comburente.

En un incendio en recinto confinado, el comburente suele ser siempre el material que limita la reacción de combustión. Utilizando la analogía del triángulo del fuego, el lado del comburente se abriría para dejar el triángulo abierto.



Figura 2. Triángulo del fuego sin comburente (Fuente [ 17])

Lo que en realidad sucede es que se ha establecido un equilibrio químico en la reacción de combustión. Poniendo un ejemplo de combustión del metano:



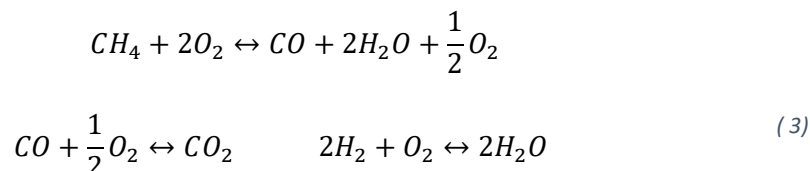
Una molécula de metano reacciona con dos moléculas de oxígeno para dar una molécula de dióxido de carbono y dos de vapor de agua. En sí, es una reacción muy exotérmica cuya dirección es casi completamente unidireccional (hacia la derecha). No obstante, no hay ninguna reacción totalmente unidireccional, sino que todas tienen en mayor o menor medida un equilibrio químico el cual puede cambiar la cantidad de reactivo y producto según perturbaciones externas a la reacción.

Siguiendo el principio de Le Châtelier que postula que “*en presencia de una variación externa sobre el equilibrio* (en el caso del ejemplo, disminución casi total de la concentración de material comburente) *el sistema se ajusta para contrarrestar dicha perturbación.*”

De esa manera, la reacción entra en equilibrio hasta volver a tener una cantidad considerable de oxígeno:



Tal y como se entiende que la reacción no es unidireccional, también se consideran los intermedios de reacción.



El monóxido de carbono aparece como intermedio de reacción en la combustión del hidrocarburo (metano). Éste es un gas combustible ya que puede oxidarse a dióxido de carbono. Es decir, en el caso ejemplificado se pueden diferenciar dos reacciones, la oxidación de metano a monóxido de carbono y la oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono. Cuando se hace un balance global de la

reacción de combustión el monóxido de carbono queda obviado, pues como intermedio de reacción equivalen la cantidad de monóxido producido como de reaccionado y desaparece.

### 2.3. INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO BACKDRAFT

Tal como se ha comentado, la compartimentación puede ser una buena solución para extinguir un pequeño incendio que se ha descontrolado, poniendo el ejemplo de un incendio en una habitación con puertas y ventanas cerradas. No obstante, esta solución que ha extinguido la combustión puede tener consecuencias desastrosas.

Teniendo en cuenta la reacción total de combustión ( 3), en un recinto confinado con ausencia del oxígeno el intermedio de reacción adquiere gran relevancia en la combustión. Como se aprecia en dicha reacción, el monóxido de carbono necesita tener oxígeno para producir dióxido de carbono. Cuando el material comburente no se encuentra en exceso, se producen gases de combustión que en sí son combustibles, ya que pueden seguir oxidándose. Es un dato que, aunque parezca obvio, puede suponer un peligro muy importante y adquirir un poder muy destructivo.



*Figura 3. Recinto confinado con una combustión incompleta en una vivienda (Fuente [ 6])*

El recinto confinado ha consumido la mayor parte de comburente, pero sigue habiendo parte de combustible y gases combustibles (como el monóxido de carbono) y una temperatura muy elevada a causa del incendio. En esencia, es una caja llena de explosivo, cuyo detonante es el aire que no puede consumir, y cuando se abre una entrada de comburente puede ser fatal.





Figura 4. Bola de fuego a causa del Backdraft (Fuente [ 6])

Al abrir la puerta, permite la entrada de material comburente al incendio aparentemente extinguido y se produce el fenómeno denominado “Backdraft” que según la norma UNE-EN ISO 13943 se define como “*combustión de llama rápida causada por la introducción repentina de aire en un espacio confinado deficiente en oxígeno que contiene productos calientes de una combustión incompleta*”.

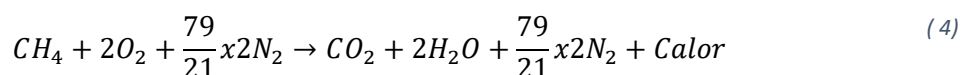
## 2.4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

Para poder comprender de manera técnica cual es el motivo y las variables de las que depende el fenómeno Backdraft hace falta realizar una pequeña definición de conceptos.

### 2.4.1. QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN

Cuando se habla de una combustión, lo que básicamente se está tratando es una reacción de oxidación, dónde un material combustible (comúnmente hidrocarburos  $C_xH_y$ ) se oxida con el material comburente para dar productos derivador de la combustión más luz y calor, ya que es una reacción exotérmica.

El aire es el material comburente, puesto que contiene oxígeno además de nitrógeno en una composición aproximadamente de 21% y 79% respectivamente. El nitrógeno no tiene propiedad de comburente, pero no pasa desapercibido en la reacción de combustión. En las reacciones con exceso de oxígeno contribuye como material combustible para dar lugar a los óxidos de nitrógeno comúnmente denominados  $NO_x$  siendo gases especialmente tóxicos y perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente. Además, en la reacción de oxidación se debe tener en cuenta la cantidad de aire que hay, aunque solo el 21% reaccionará como oxidante.



En un incendio en recinto confinado se tiene en cuenta la cantidad de aire inicial o el caudal de aire que se aporta a la combustión, y es importante conocer entonces que el 100% de dicho aire no es material comburente.

Una vez comprendidos los reactivos que intervienen en la reacción: combustible y comburente (en este caso hidrocarburos y aire) necesitan de una fuerte energía de activación para poder comenzar una reacción que se mantendrá por si sola.

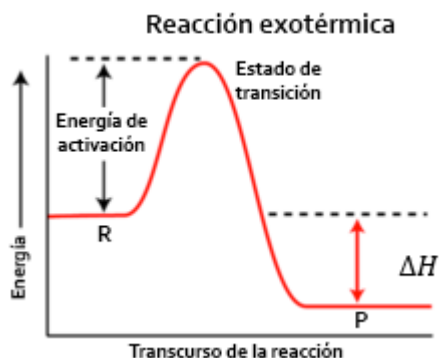


Figura 5. Energía de activación (Fuente[ 18])

La energía de activación es la energía mínima requerida para que se produzca una reacción química. Como su nombre indica, es la energía que activa las moléculas de los reactivos para que comiencen a moverse y a vibrar a mayor velocidad, de manera que puedan colisionar entre si y romper los enlaces de las moléculas iniciales.

La energía de activación se expresa según la ecuación de Arrhenius como:

$$E_a = RT^2 \frac{d \ln(k)}{dT} \quad (5)$$

Es decir, que la energía de activación de una reacción dada no es siempre la misma, sino que depende de la temperatura.

En la reacción de oxidación del metano, se debe superar cierta temperatura para romper por primera vez los enlaces de los reactivos:

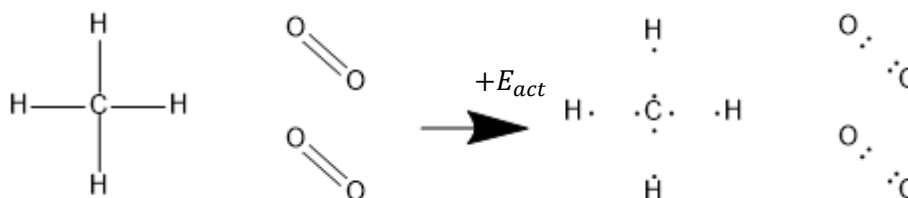


Figura 6. Rotura de enlaces debido a la energía de activación (Fuente: propia)

Como se muestra en la Figura 6, al aplicar una elevada temperatura (por cualquier tipo de fuente de energía) los enlaces que formaban las moléculas de los reactivos se descomponen formando radicales. En la descomposición de los enlaces no tienen por qué formarse los radicales perfectos de cada

elemento, sino que se van desprendiendo progresivamente dando lugar a los distintos compuestos de transición.

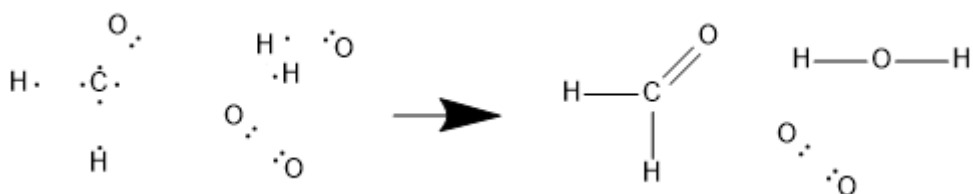


Figura 7. Redistribución de las moléculas formando nuevos compuestos de transición (Fuente: propia)

En primer lugar, reacciona el metano con el oxígeno para dar lugar al formaldehído mientras que el hidrogeno liberado va formando vapor de agua con los radicales libres del oxígeno. La formación de nuevas moléculas libera calor.

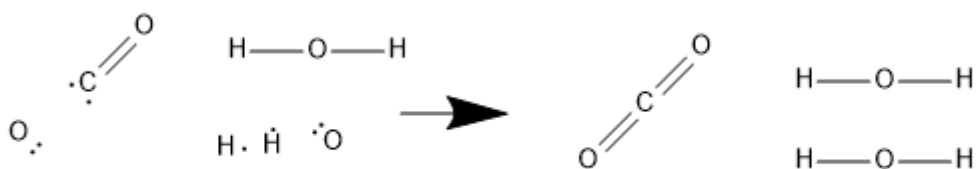


Figura 8. Redistribución de las moléculas formando los productos de la combustión (Fuente: propia)

Continuando con la oxidación, el radical del carbonilo (CO) se convierte en el dióxido de carbono y se forma la segunda molécula de agua.

Durante el periodo de descomposición del metano y oxígeno para la formación de dióxido de carbono y vapor de agua se ha liberado una gran cantidad de calor, que es suficiente para que la reacción se mantenga por sí misma. Y para entender el concepto de liberación de calor se debe comprender el punto de vista termodinámico de la reacción.

Cuando se habla de una reacción exotérmica, se habla de una reacción que libera calor por la diferencia de energía entre los reactivos y los productos. Observando la Figura 5, se puede deducir que la energía de los reactivos es inferior o, mejor dicho, más negativa que la de los productos. Dicha energía es la denominada “entalpía de formación”.

Se podría explicar la entalpía de formación como la energía que “valen” los enlaces que componen una molécula. Ya que es la energía necesaria para formar una molécula desde las especies elementales que lo componen.

La entalpía de formación se toma de manera experimental de tablas termodinámicas. Por ello es una manera muy eficiente de calcular el calor de una reacción.

Pero el calor liberado en una reacción se puede calcular por la cantidad de enlaces que se crean y se destruyen de la misma manera:

Tabla 1. Energía de enlaces (Fuente [ 22])

Enlace	Energía de enlace (KJ/mol)
C-H	413
O=O	495
C=O	799
H-O	467

El calor liberado en la reacción es el balance de la energía aportada para romper los enlaces que es positiva ya que debe ser incorporada (4 de C-H y 2 de O=O) más la energía necesaria para formar un enlace que es negativa ya que se desprende (2 de C=O y 4 de H-O).

$$\Delta H_R = (413 \times 4 + 495 \times 2) - (799 \times 2 + 467 \times 4) = -824 \frac{KJ}{mol} \quad (6)$$

Se observa que el calor liberado se asemeja mucho entre las dos maneras de cálculo. Pero deducir el calor generado mediante la energía consumida y liberada al romper y formar nuevas moléculas es una manera más visual de entender el calor que se puede generar en una reacción.

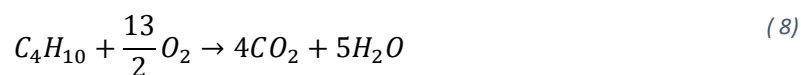
#### 2.4.2. ESTEQUIOMETRIA DE LA COMBUSTIÓN

En el apartado anterior, en las Figuras 6, 7 y 8 se entiende de un modo muy visual, cómo una molécula de metano necesita dos moléculas de oxígeno para poder obtener una molécula de dióxido de carbono más dos de vapor de agua.

A esta relación entre los reactivos se le llama estequiometria de una reacción dada. En el caso de la combustión, siempre se hace referencia a la cantidad necesaria de oxígeno que necesita una sola molécula de hidrocarburo para llevar a cabo la reacción. Poniendo unos ejemplos de reacciones:



*Combustión de metano*



#### *Combustión de butano*

Los mostrados son unos de los hidrocarburos más comunes en las viviendas. Cada molécula de hidrocarburo, según su fórmula molecular, tiene una estequiometría u otra. A mayor es la molécula de combustible, mayor cantidad de oxígeno necesita para llevar a cabo la reacción y mayor cantidad de gases de combustión genera.

Pero La relación estequiométrica del combustible y el comburente no siempre es respetada en una situación real. Sino que dependiendo de la cantidad de reactivos que haya, se hablará de una combustión estequiométrica, una combustión completa (o con exceso de aire) o una combustión incompleta (o con defecto de aire).

##### **2.4.2.1. Combustión estequiométrica**

Es la combustión teórica, donde una molécula de combustible reacciona con la mínima cantidad necesaria de oxígeno para producir el número exacto de dióxido de carbono y vapor de agua. En este tipo de combustión los gases de combustión no contienen ni combustible ni comburente ya que se han quemado en las proporciones exactas.

La combustión estequiométrica es la más eficiente, y por lo tanto la que más calor genera. En el ejemplo visual de un mechero, se distinguiría como la llama azul.

##### **2.4.2.2. Combustión completa (exceso de aire)**

En este caso, se llama combustión completa porque el 100% del combustible ha reaccionado, pero con un exceso de comburente. Eso se traduce en que hay presencia de oxígeno en los gases de combustión.

Este tipo de combustión no es la importante para este documento, ya que en el fenómeno Backdraft siempre hablamos del caso contrario, la combustión en defecto de aire. No obstante, este tipo de combustión tiene sus peligros, ya que como se recuerda de la ecuación ( 4), el nitrógeno forma parte de la reacción. Aunque aparentemente inerte, en exceso de aire puede llevar a cabo la formación de óxidos de nitrógeno.



Las combustiones en exceso de aire pueden producir como se ve en las anteriores ecuaciones estos y más óxidos de nitrógeno, que como se aprecia, varía en la cantidad de nitrógeno y oxígeno que contienen y por ello se suelen denominar NOx (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>...). Se conoce que una de las diferencias entre la combustión interna de un vehículo que utiliza gasolina y otro que utiliza diésel, es

que el diésel convierte ciertos nitrógenos del combustible, así como el propio nitrógeno del aire en estos tóxicos y perjudiciales gases.

#### **2.4.2.3. Combustión incompleta (defecto de aire)**

La combustión incompleta es la más importante para este documento, ya que es la propia de un recinto confinado. En esta combustión, los combustibles no llegan a su máximo grado de oxidación porque la cantidad de aire es inferior a la cantidad mínima necesaria y los compuestos de transición (como los de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 9) pueden detener la oxidación quedándose en esa forma ( $H_2$ ,  $CO$ ...). De esa manera, hay presencia de materiales combustibles en los humos de combustión.

#### **2.4.3. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD**

Con todo lo definido en el apartado de estequiometría, es normal preguntarse cuál es, entonces, la cantidad mínima y máxima de aire para que la reacción sea completa, incompleta...

Es entonces cuando entran en juego los límites de inflamabilidad (o de explosividad, ya que según las condiciones puede originar una explosión), que como el nombre indica, es el rango en el cual una sustancia (pura o compuesta) puede llevar a cabo la combustión.

##### **2.4.3.1. Límite inferior de inflamabilidad (LII)**

Se traduce como la cantidad mínima de gas combustible en el aire necesaria para poder llevar a cabo la combustión. Según la ficha técnica del INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) esto es debido a que, por debajo de cierta concentración de gas combustible en el aire al ponerse en contacto con una fuente de ignición, no existe propagación de la llama.

##### **2.4.3.2. Límite superior de inflamabilidad (LSI)**

Tal como existe un límite inferior por el cual no se puede propagar la llama, existe un límite superior por el cual la concentración de combustible es superior a la necesaria y no permite que el aire actúe como comburente.

Según la ley de los gases ideales, en condiciones de contorno normales (presión de 1 atm y temperatura de 273 K), un mol de gas ocupa un volumen de 22,4 litros. Sea el gas que sea. Termodinámicamente no tiene mucho sentido que un mol de metano ocupe el mismo volumen que un mol de aire, y se pueden tratar como gases reales tomando ciertas variables. No obstante, la ley de los gases ideales es una aproximación muy válida para los límites de inflamabilidad.

Los límites de inflamabilidad se miden en porcentaje de volumen. Es decir, el volumen que ocupa un gas frente a otro. Como en todo momento se está hablando de gases de combustión, se puede estimar que el porcentaje volumétrico de un gas frente a otro equivale a la fracción molar de dichos gases si se tratan como gases ideales.

Cada gas tiene su rango de inflamabilidad propio:

Tabla 2. Rango de inflamabilidad de distintas sustancias en el aire (Fuente [ 21])

COMBUSTIBLE	L.I.I. (%)	L.S.I. (%)
HIDROGENO	4	75
METANO	5	15
PROPANO	2.1	9.5
BUTANO	1.8	8.4
ISOOCTANO	1.4	7

El hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad increíblemente amplio, por ello se debe tener mucha precaución a la hora de trabajar con este gas. Y en caso de trabajar con estos gases sin una atmosfera inerte, siempre se debe trabajar fuera de los rangos de inflamabilidad. Como prevención, según el INSHT *“son más seguros los procesos que se desarrollan por debajo del límite inferior de inflamabilidad, adoptando un factor de seguridad 4 ó 5 que equivale a estar entre el 25 ó 20% del L.I.I., que los que se desarrollan por encima del límite superior de inflamabilidad, ya que en caso de fuga, pérdida o disminución de combustible podría aumentar el contenido de aire y se situarían dentro del campo de inflamabilidad.”*

El límite de inflamabilidad tiene muchas variables. Si la concentración de oxígeno del aire aumentase en un cierto proceso, experimento o caso, no sólo se necesitaría una energía mínima de ignición menor, sino que el rango de inflamabilidad sería más amplio también. Variaría también con la temperatura y presión de los gases. Los límites de la Tabla 2 son generales para el aire normal en condiciones ambientales.

#### **2.4.4. LLAMA DE DIFUSIÓN Y LLAMA DE PRE-MEZCLA**

Cuando se lleva a cabo una combustión, es debido a que se han juntado un combustible y un comburente. Dependiendo de la manera que se hayan juntado estas sustancias se producirá una llama de mayor o menor potencia.

##### **2.4.4.1. LLAMA DE PRE-MEZCLA**

Este tipo de llama es la resultante de una combustión donde combustible y comburente han sido mezclados previamente. A consecuencia de la relación entre combustible y comburente, la llama puede alcanzar muy altas temperaturas si se quema en el rango estequiométrico, lo cual se puede observar por la tonalidad azul de la llama.

La pre-mezcla puede ser accidental o provocada. El ejemplo claro de una llama de pre-mezcla provocada serían los fogones de la cocina, donde el gas sale por un conducto, mezclándose con el aire por los conductos especialmente diseñado para ello, y llevando a cabo una combustión muy controlada y con un poder calorífico óptimo. No obstante, en un incendio puede deberse a que una gran

turbulencia haya desencadenado una homogenización entre el combustible y comburente que los haya mezclado y una posterior deflagración con una llama muy intensa.

#### **2.4.4.2. LLAMA DE DIFUSIÓN**

Por el contrario a la llama de pre-mezcla, se encuentra la llama de difusión, que es la generada cuando se encuentran combustible y comburente de manera natural, sin mezcla previa. En este caso, un gas inflamable se encuentra con el oxígeno del aire llevando a cabo la combustión. El claro ejemplo sería el de una vela: los gases inflamables procedentes del vapor de la cera se van encontrando con el oxígeno del ambiente donde finalmente se mezclan generando la combustión.

#### **2.4.5. CORRIENTE DE GRAVEDAD**

Cuando dos fluidos entran en un volumen de control, la diferencia de densidad dicta el movimiento o corriente que se va a generar entre ellos. Las corrientes de gravedad son flujos generados por gradientes de presión horizontales resultantes del efecto de la gravedad sobre fluidos de diferente densidad [ 16].

En un incendio en recinto confinado, la corriente de gravedad es generada por el aire y el gas combustible. Es un requisito básico para el Backdraft, que el aire frío más denso que el combustible, forme una corriente de gravedad lo suficientemente turbulenta para que se mezclen combustible y comburente llegando a un rango de inflamabilidad adecuado para la combustión.

### **2.5. EXPLICACIÓN TÉCNICA DEL FENÓMENO BACKDRAFT**

Todos los conceptos definidos son importantes para el entendimiento del documento y del fenómeno Backdraft. En una definición más rigurosa del Backdraft, se habla de una combustión incompleta, donde el gas de la combustión sigue siendo inflamable, pero no continua la combustión por falta de oxígeno. En el momento en que una fuente de aire se abre, se genera una corriente de gravedad en la que el gas inflamable sale del recinto y el aire frío entra por debajo, desplazando el gas combustible y creando una interfase turbulenta entre dichos fluidos. A medida que el aire va tomando cavidad en el recinto se llega al límite superior de inflamabilidad, y habiendo una fuente de ignición en la interfase del aire y del gas combustible, en la cual se están pre-mezclando los fluidos, se produce una deflagración que empuja los gases de combustión y el gas combustible fuera del recinto por el orificio de entrada y salida al recinto confinado, provocando de esa manera una bola de humo, que a la vez contiene gases inflamables a alta temperatura que se van quemando con el aire del exterior en forma de llamas de difusión provocando la bola de fuego.



## Capítulo 3. Simulación numérica del fenómeno Backdraft

### 3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL BACKDRAFT

En este capítulo se pretende realizar un modelo tridimensional para una simulación por CFD del fenómeno Backdraft. Para poder dar validez a la simulación, se debe poder comparar con un modelo real. Para ello se realizará un experimento controlado, en el cual se pueden medir las condiciones iniciales en las que se da lugar a un Backdraft. Con los datos recopilados de dicho experimento se puede probar si la simulación que lo replica se comporta de la misma manera.

### 3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTO

Este experimento se basa en realizar un Backdraft controlado en un recinto confinado especialmente diseñado para ello. Este recinto confinado, comúnmente llamado “pecera” o acuario de laboratorio de bomberos es propiedad del consorcio provincial de bomberos de Valencia. El experimento fue llevado a cabo el día 30 de diciembre de 2016 en el parque de bomberos de Chiva, Valencia. Los ensayos fueron supervisados por ingenieros químicos dentro del cuerpo de bomberos.

El objetivo directo del experimento es conseguir datos para el modelo de CFD comprobando que se asemeja a la realidad. Para ello, se ha utilizado un acuario de laboratorio para bomberos comúnmente utilizada para enseñar límites de inflamabilidad, así como de simular un Backdraft a pequeña escala.



Figura 9. Pecera de laboratorio para bomberos en el parque de bomberos de Chiva. (Fuente: propia)

La pecera ilustrada está fabricada con una chapa de acero inoxidable y tres superficies de cristal. Tiene una altura de 0,8 m y unas medidas de 0,75 m x 0,5 m. El conjunto completo consta de dos compartimentos situados uno sobre otro. Para mayor información consultar el documento Planos.

El superior constituye la zona de experimentos y tiene una altura de 0,5 m, mientras que el inferior es una zona de servicio de 0,3 m de altura. En la parte superior hay unas trampillas de descarga. En el perfil donde no hay cristal se sitúa la abertura de la pecera, que es una puerta de 0,255 m x 0,255 m

situado en la parte derecha. Esta puerta está cerrada por una lámina de acero inoxidable con un asa para poder retirarla en el momento deseado.

El cristal es laminado de 8 mm adecuado para todos los experimentos excepto para aquellos que emplean oxígeno puro y para las llamas de larga duración dirigidas directamente hacia la superficie del cristal.

En el compartimento de servicio se localizan el motor, el transformador de arco eléctrico, la instalación de gas inflamable (a conectar con la bombona) y un medidor de tiempo. Esta sección se encuentra totalmente ventilada ya que toda su parte posterior está constituida por una rejilla de acero.

La carcasa exterior está recubierta de pintura amarilla excepto las trampillas situadas en la parte superior que son de acero inoxidable con bisagras de cobre dadas las altas temperaturas que se alcanzan en los experimentos. El conjunto está provisto de asas de transporte.

La ignición se produce gracias a un arco eléctrico de media pulgada. Un transformador de arco eléctrico mantiene la ignición a través de unos electrodos cerámicos situados en el suelo del compartimento de experimentos.

Dentro de la pecera hay 3 dispositivos controlados por un mando: la entrada de gas inflamable, la activación del arco eléctrico y un pequeño ventilador que se emplea para homogeneizar la mezcla de gases.

La información de la pecera ha sido proporcionada por el “manual de operación y mantenimiento de flashover de sobremesa del grupo inster”.

El objeto del experimento es validar un modelo virtual. Para ello se han grabado distintos ensayos de Backdraft con una cámara térmica Dräger UCF 8000, propiedad del consorcio provincial de bomberos de Valencia.



Figura 10. Cámara térmica Dräger UCF 8000. (Fuente: propia)

### 3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El experimento se basa en realizar un Backdraft en la pecera de laboratorio. Los datos que se deben recopilar son los tiempos de ignición en base a la concentración inicial de butano, así como el comportamiento de los fluidos previos a la deflagración y en la deflagración captados con la cámara térmica.

#### 3.3.1. TIEMPOS DE IGNICIÓN

Cabe destacar, que los experimentos realizados se basan en aproximaciones, debido a la complejidad y peligrosidad del fenómeno Backdraft, las fugas de aire implícitas en la pecera, ya que no es completamente hermética. Así como los ensayos son únicos e irrepetibles, puesto que tras haber realizado una de las deflagraciones, se calienta la pecera y ello implica un cambio en los límites de inflamabilidad del gas utilizado.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- Calcular el caudal de gas inflamable

Para calcular el caudal de gas inflamable se ha de cronometrar el tiempo necesario para llegar al límite inferior de inflamabilidad. Es decir, utilizando butano el cual tiene un límite inferior de inflamabilidad de 1,8% según la tabla 2, cuánto tiempo se tarda en llegar a ese porcentaje volumétrico.

Para realizar el ensayo se debe poner en marcha el ventilador de la pecera, el arco eléctrico, el inyector de gas butano y el cronómetro de manera simultánea. Una vez se alcance el 1.8% en volumen, la mezcla prenderá fuego y será el tiempo de referencia de caudal. La puerta de la pecera debe estar cerrada.

Cada vez que se realice el experimento se debe dejar el tiempo necesario para que la pecera se enfríe y tener mayor objetividad en los datos.

- Calcular el tiempo de ignición

Una vez obtenido el caudal de gas inflamable, se debe realizar el ensayo para distintas concentraciones de butano, por ejemplo 15%, 12%, 10%, 9,5%... Siempre que no sea menor de 8,4% ya que es el límite superior de inflamabilidad. Tampoco se aconseja alejarse mucho del L.S.I. ya que tardaría mayor tiempo en producirse la ignición y supondría una deflagración de mayor tamaño que podría descontrolarse.

Para realizar este ensayo se debe poner en marcha el ventilador con la puerta de la pecera cerrada y esperar el tiempo necesario para llegar a dichas concentraciones. Una vez alcanzada dicha concentración se debe encender el arco eléctrico y comprobar que no existe llama (siempre es posible que aparezcan ciertas "llamas frías" que desaparecen en pocos segundos). Una vez comprobado que no es capaz de llevarse a cabo la combustión, se apaga el ventilador, se mantiene encendido el arco eléctrico y se abre la compuerta encendiendo el cronómetro de manera simultánea. El tiempo de ignición será en el momento en que se produzca la deflagración.

#### 3.3.2. VISUALIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE GRAVEDAD Y EL BACKDRAFT

Gracias a la cámara térmica se puede observar el gas inflamable salir del recinto confinado, al igual que el aire entrando. La idea es grabar desde el momento que se abre la puerta del compartimento y

empieza a entrar el aire dentro de la pecera. La cámara térmica Dräger UCF 8000 graba de manera continua.

Para realizar la grabación con éxito se debe encender la cámara y poner el modo más conveniente. Dentro de los modos de captación térmica de la cámara están el estándar, para humanos, para fuego y escáner térmico. En el experimento se ha grabado con modo fuego que aumenta la escala para apreciar las más altas temperaturas, así como en el modo escáner térmico para ver más allá de la escala de grises.

### 3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

#### 3.4.1. RESULTADOS DE CAUDAL DE GAS INFLAMABLE

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.2.1., se ha calculado el caudal de gas butano que se introduce en la pecera con el límite inferior de inflamabilidad del butano y el tiempo necesario para llegar hasta éste.

Tabla 3. Caudal de gas butano a la pecera (Fuente: propia)

Concentración (% en vol.)	Tiempo (s)
1.8	38
1.8	39
1.8	37

El promedio de caudal de gas butano entrando a la pecera es de 0,047%/s. Es decir, si se quiere conseguir una concentración del 15% en butano dentro de la pecera, el tirador de gas debe estar aproximadamente 5 minutos y 20 segundos activado, y a partir de ese momento abrir la puerta.

#### 3.4.2. RESULTADOS DE TIEMPOS DE IGNICIÓN

Como se ha comentado con anterioridad, los experimentos son únicos e irrepetibles, muchas veces ni siquiera se produce el Backdraft y otras veces ocurre muy deprisa. Esto se debe al azar del que depende que la corriente de gravedad se sitúe exactamente donde se coloca el arco eléctrico creándose por la turbulencia una pequeña pre-mezcla, dentro del rango de inflamabilidad.

Siendo un fenómeno tan complejo en variables, los datos obtenidos son bastante alentadores.

Tabla 4. Tiempos de ignición (Fuente: propia)

Concentración (% en vol.)	Tiempo de ignición (s)
15	70
11.5	57.9
10.9	53.9
10.5	5.3
9.5	0
9.5	0
9	26

El tiempo de ignición es el tiempo que tarda en provocarse la combustión desde el momento que se abre la puerta. Como se observa en la Tabla 4 en el experimento cuya concentración inicial es de 10,5% el tiempo de ignición es muy temprano, totalmente discorda a los anteriores. Así como el del experimento realizado con concentración 9.5% el cual se realizó dos veces con el mismo resultado, una deflagración instantánea.

Esto puede ser debido a una pobre ventilación de la pecera entre experimentos, lo cual conllevaría que podría haber restos de gases de las anteriores combustiones o que la pecera estuviese muy caliente aumentando el rango de inflamabilidad y consecuentemente disminuyendo el tiempo de ignición.

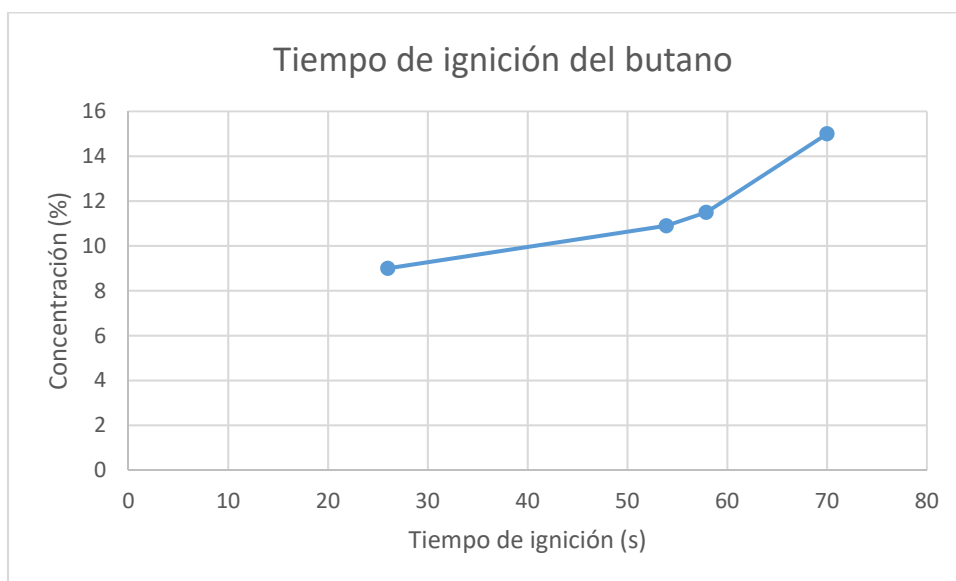


Figura 11. Gráfico de la concentración de butano en % de volumen frente al tiempo de ignición en segundos (Fuente: propia)

Habiendo eliminado los datos anómalos de los experimentos errantes, se observa en la Figura 6 que sigue una tendencia a mayor tiempo de ignición por mayor concentración de butano.

### 3.5. INTRODUCCIÓN AL CFD

Los métodos numéricos CFD (Computational Fluid Dynamics) son una herramienta cada vez más implementada en problemas de ingeniería tales como aeronáutica, mecánica, química, así como ingeniería contra incendios. Las herramientas CFD se utilizan para resolver mediante métodos numéricos y algoritmos problemas de mecánica de fluidos.

La gran ventaja que tienen estos programas de simulación, es poder diseñar un proyecto de manera virtual ahorrando los costes que suponen hacer plantas piloto, prototipos y demás.

La ciencia de la simulación virtual en proyectos de ingeniería nació alrededor de los años 40 pero empezó a tener importancia en la década de los 60, cuando el hombre se planteó viajar al espacio. Hay ciertos proyectos en ingeniería donde no es factible hacer un prototipo y jugar al ensayo y error. En este caso en concreto, la NASA decidió investigar algoritmos y métodos numéricos con los que saber si la nave Apolo 11 podría alcanzar su objetivo.

Cuando se habla de CFD también se habla del método de los elementos finitos (FEM), el cual permite resolver problemas físicos sobre geometrías complicadas, creando mallados que se aproximen en mayor o menor medida a la geometría propuesta.

En CFD se suele trabajar con modelos tridimensionales, en estos modelos se aplica un mallado espacial que divide el modelo en pequeños volúmenes de control en los cuales se aplican ecuaciones creando millones de cálculos. Estas simulaciones pueden ser estáticas o en función del tiempo, dónde se muestra una evolución según un intervalo de tiempo impuesto (timestep) y se realizan todos los cálculos en cada región de tiempo.

Estas variables, el mallado del modelo y el timestep son las que imponen la cantidad de cálculos a realizar en la simulación, pudiendo llegar a ser simulaciones de días y de una cantidad de información de Terabytes. En las últimas décadas, la tecnología ha hecho viable que estas simulaciones puedan ser parte de nuestra vida, y que sean soportadas incluso por un ordenador particular. No obstante, esto era inviable hace relativamente poco.

Estas mejoras han hecho que el mundo del CFD se expanda, y que la disciplina de la ingeniería de protección contra incendios utilice simulaciones numéricas para innovar en métodos preventivos, como buscar las mejores geometrías de ventilación en edificios para una protección óptima, o incluso para peritaje de incendios ocurridos.

Fleischmann [ 4] en 1999 hizo los mayores progresos en las corrientes de gravedad relacionadas con el Backdraft realizando experimentos de corrientes de gravedad en agua salada e implementadoras en sus modelos numéricos. El doctor Daniel Gojkovic [ 3] realizó una serie de experimentos simulando el Backdraft y recopilando los datos necesarios para realizar una simulación numérica.

A partir de sus referencias, personas como Adrei Horvat [ 1] y Georges Guigay [ 2] han utilizado partes de sus experimentos para realizar simulaciones del Backdraft obteniendo resultados muy alentadores.

### **3.6. SELECCIÓN DEL PROGRAMA UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN**

Los paquetes de herramientas de simulación más utilizados son los que proporciona la empresa ANSYS, pero no son los únicos.

El instituto nacional de estándares y tecnología (NIST) ofrece simuladores gratuitos como el Fire Dynamics Simulator (FDS), Consolidated Fire and Smoke Transport Model (CFAST) así como un visualizador "SmokeView". Estos softwares gratuitos desarrollados por el NIST son muy útiles para los profesionales del sector, tanto que empresas como ThunderHead Engineering han creado softwares de pago como el PyroSim cuya función es reducir el tiempo necesario para construir modelos complejos en FDS pudiendo importar modelos de CAD complejos de otros softwares; o el Pathfinder cuya función es simular evacuaciones con simulación de movimiento avanzado para estructuras complejas.

A día de hoy, existen empresas de protección y seguridad como Cepretec que utilizan herramientas de simulación para minimizar riesgos y pérdidas en caso de emergencia. Para ello utilizan el software de FDS y PyroSim con un fin lucrativo.

No obstante, el software FDS no es el más recomendado para la simulación del fenómeno Backdraft, ya que se considera un uso muy avanzado del software FDS. De hecho, el Dr. Georges Guigay considera en su tesis doctoral que no es posible modelar el escenario entero del Backdraft en FDS puesto que los sub-modelos encargados de la combustión de la pre-mezcla de gases y su consecuente deflagración no han sido desarrollados todavía.

Dicho esto, el autor Andrej Horvat consigue una simulación muy interesante en el artículo “Numerical simulation of backdraft phenomena” en el Fire Safety Journal en abril de 2007 utilizando el simulador CFX de la compañía ANSYS demostrando que es el software más recomendado para la simulación en CFD del fenómeno Backdraft.

### **3.7. MODELOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN**

Los paquetes de CFD utilizan ecuaciones teóricas de prestigiosos científicos y matemáticos del pasado como Claude Navier, George Stokes, Daniel Bernouilli, Leonard Euler, Luddwig Prandtl, Osborne Reynolds por nombrar unos pocos. Estas ecuaciones se presentan en modelos de turbulencia, de combustión y de radiación. Cada modelo está recomendado para cierto tipo de problemas, y la selección del modelo más afín a tu modelo es una decisión muy importante.

#### **3.7.1. MODELO DE TURBULENCIA**

Existen gran variedad de modelos de turbulencia en el paquete ANSYS CFX 17.0, entre ellos hay un importante número de modelos que se basan en las ecuaciones de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), y otros modelos que no se basan en ellas como el Large Eddy Simulation (LES), así como mezclas de distintos modelos como el Detached Eddy Simulation (DES).

Este último modelo, el DES, utiliza las formulaciones del modelo SST (Shear Stress Transport), pero con predicciones más precisas en regímenes turbulentos.

Los modelos que se basan en las ecuaciones de RANS tienen problemas al enfrentarse a fluidos con un número de Reynolds muy elevado, y en un modelo de combustión, en especial en el Backdraft, donde se pretende crear un régimen muy turbulento en la corriente de gravedad, se deben utilizar modelos de Eddy como el modelo LES o el DES. Georges Guigay [ 2] utiliza el modelo LES en el programa FDS, no obstante el autor Andrei Horvat [ 1] utiliza el modelo DES en el programa CFX de ANSYS, ya que es el más conveniente.

#### **3.7.2. MODELO DE COMBUSTIÓN**

En comparación con el número de modelos que hay de turbulencia, no existen tantos de combustión. En el paquete CFX se presentan el modelo Eddy Dissipation Model (EDM), el Finite Rate Chemistry Model (FRC), una combinación de los dos anteriores (FRC/EDM), y los modelos laminares Flamelet model for diffusion flames and flamelet model for burned mixture (FLL).

En este punto es difícil elegir el modelo más correcto. Los modelos Flamelet, se basan en librerías específicas del ANSYS, donde se encuentran datos reales del comportamiento de ciertas sustancias. Para el fenómeno Backdraft, es un modelo muy interesante, ya que respeta los límites de inflamabilidad de una sustancia concreta, además de tener una función muy interesante que es poder aplicar una chispa (Spark Kernel) de la potencia demandada en un punto y tiempo concreto del modelo.

No obstante, los modelos Flamelet se pueden aplicar a casos muy concretos, y en los resultados obtenidos con dicho modelo no se ha conseguido la combustión.

Por otra parte, el modelo EDM es el utilizado por Andrei Horvat [ 1] siendo un modelo muy válido para reacciones de combustión. Este modelo no respeta los límites de inflamabilidad, sino que se basa en el concepto de que la reacción química se produce cuando los reactivos de mezclan a nivel molecular.

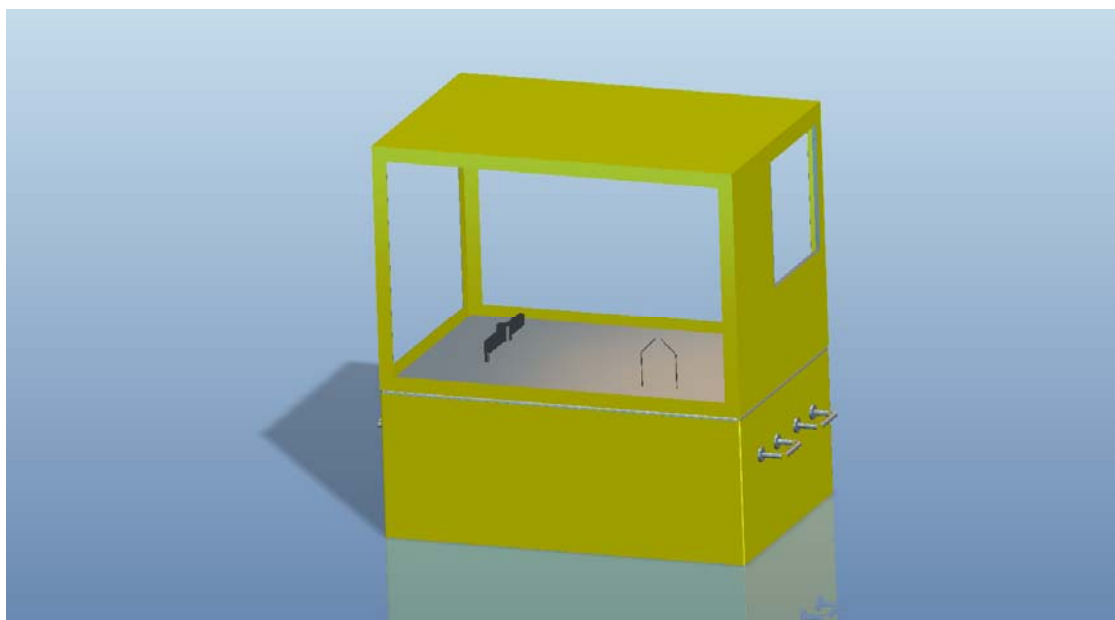
En el modelo se ha utilizado el modelo EDM, ya que es el modelo más válido de combustión para el caso. El tiempo de ignición se ha calculado monitorizando el punto donde se encuentra el arco eléctrico, de esa manera, se le impone al sistema que respete los límites de inflamabilidad.

### **3.8. REALIZACIÓN DEL MODELO**

#### **3.8.1. GEOMETRÍA DEL MODELO**

##### **3.8.1.1. MODELO DISEÑADO EN CREO (PTC)**

Para la realización del modelo de CFX se ha realizado un modelado tridimensional de la pecera utilizada durante los ensayos del experimento. La pecera se ha modelado con las medidas reales en el programa de modelaje tridimensional CREO del paquete PTC (Pro Engineer).



*Figura 12. Pecera modelada por ordenador. (Fuente: propia)*

En la Figura 12 se muestra la pecera modelada por ordenador con un programa específico para ello.

La geometría se ha realizado en Creo y se ha exportado al paquete ANSYS. El fichero ha sido exportado en formato STEP que es un formato universal para poder intercambiar información de un programa a otro.

La geometría exportada en ANSYS es un poco más sencilla, carece de asas, ventilador, tubo de salida del gas inflamable ni arco eléctrico. Estos elementos carecen de importancia en la simulación y comprenderían un plus de cálculos a la simulación.

##### **3.8.1.2. MODELO EXPORTADO A ANSYS WORKBENCH 17.0**

Una vez diseñado el modelo en CREO y exportado en un formato válido para ANSYS, se ha dividido en 3 partes. Un cuerpo sólido que sería la pecera, un fluido contenido en el interior de la caja al que se llamará "fluido interior" y un fluido que rodea el conjunto de 2,1 x 2,1 x 2 metros en las coordenadas



(x, y, z) respectivamente al que se llamará “entorno”, estando la pecera colocada a 0,1 metro del suelo, 0,1 metro del fondo y centrada en el eje z, tal y como se muestra en la Figura 13.

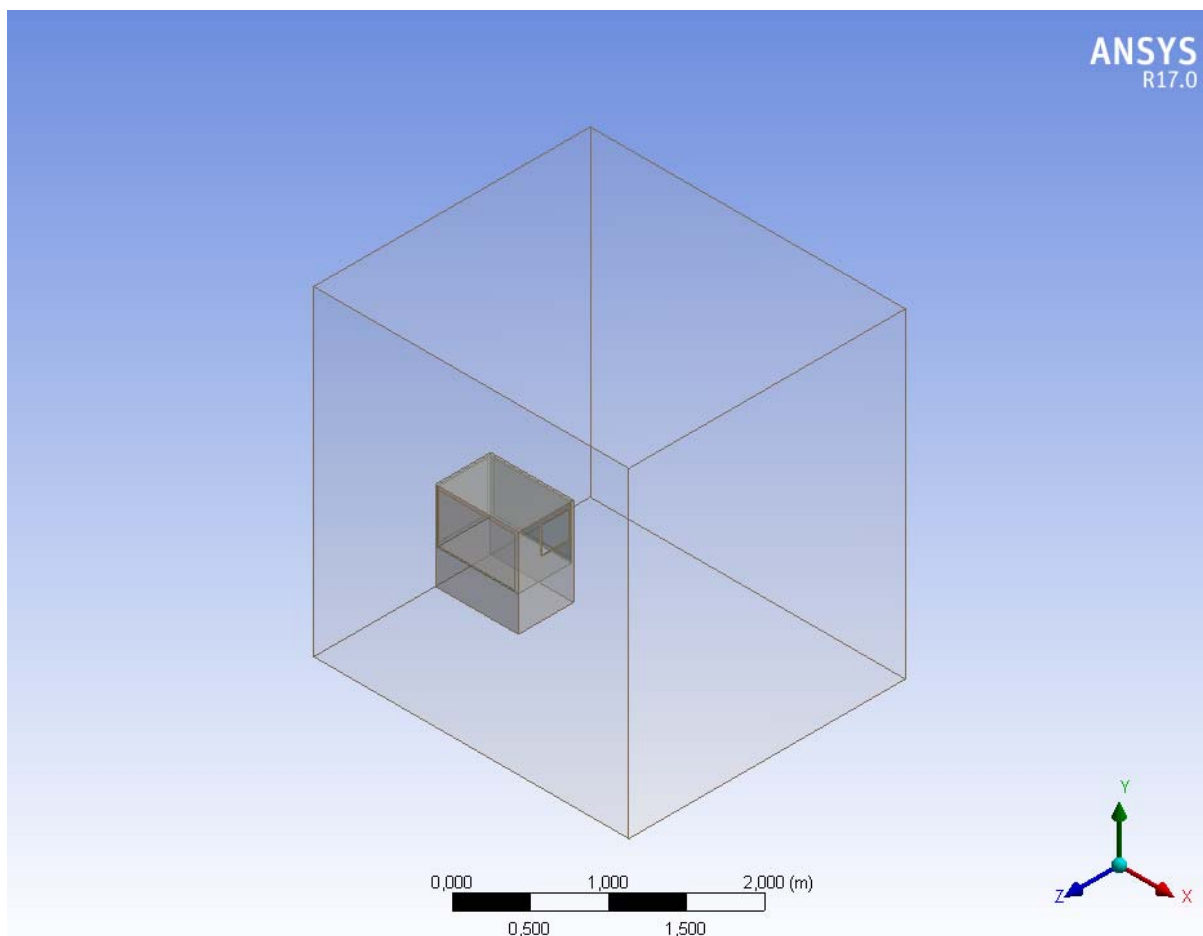


Figura 13. Modelo virtual de CFD en ANSYS. (Fuente: propia)

### 3.8.2. MALLADO DEL MODELO

El mallado del modelo virtual es una parte esencial del trabajo. Del mallado elegido dependen los resultados, ya que se trabaja en método de elementos finitos (FEM). La variable del tamaño y forma de mallado tiene relevancia a la hora de resolver el problema. Si el mallado no es lo suficientemente pequeño, pueden surgir fallos en la simulación, o incluso puede que no converja.

En el trabajo realizado, el mallado mínimo era el suficiente como para que dentro del mallado cupiese la fuente de ignición, ya que, si la fuente de ignición no está cubierta por más de una celda, el modelo no puede converger. Hay otro parámetro que obliga a utilizar un mallado más pequeño, este parámetro es el de “overflow”. En la simulación, cuando se produce la ignición, la cantidad de productos que se generan puede conducir a un fallo de cálculos creando una incongruencia de balances másicos que puede resultar en un error de la computadora denominado “overflow”.

Siendo cierto que, a menor tamaño de malla, mejores o más fiables serán los resultados. También es cierto que la cantidad de operaciones se multiplica, por lo que una simulación sencilla puede alargarse y tardar mucho más tiempo y tamaño de fichero de lo que realmente es efectivo.

El mallado más pequeño para el cual el sistema converge en el momento de la deflagración es para un tamaño de mallado de 11225 elementos y sus consecuentes 2455 nodos. El mallado máximo utilizado es de 706523 elementos y 130856 nodos. Como se ha comentado antes, realizar mayor mallado conlleva mayores cálculos, pero mejores resultados, por lo que se debe buscar un equilibrio en el cual, los resultados sean buenos, pero que no difieran del resultado del mallado máximo. El mallado empleado en el modelo es mediante el método de tetraedros y dicho modelo consta de 64070 elementos y 12884 nodos. De ellos, la pecera contiene 1663 elementos, el fluido interior 878 y el entorno 61529 elementos. Los elementos generados por el mallado siguen una gran variedad de parámetros, de entre ellos, los más importantes para el tamaño de mallado son la relevancia (-100,100) que te permite poner preferencia a la velocidad de la solución (-100) o a la exactitud (+100) recordando que, un mallado más fino usa más recursos, se ha fijado en cero un término medio; Y el centro de relevancia que complementa el indicador de relevancia del mallado (Fine, Medium, Coarse) el cual se ha fijado en medio. Al realizar distintos ensayos con distintos tamaños de mallado, se ha decidido que no hay diferencia significativa entre el mallado máximo y el utilizado, mientras que el mallado mínimo utilizado para el cual convergía el sistema, no era adecuado para una reacción de combustión.

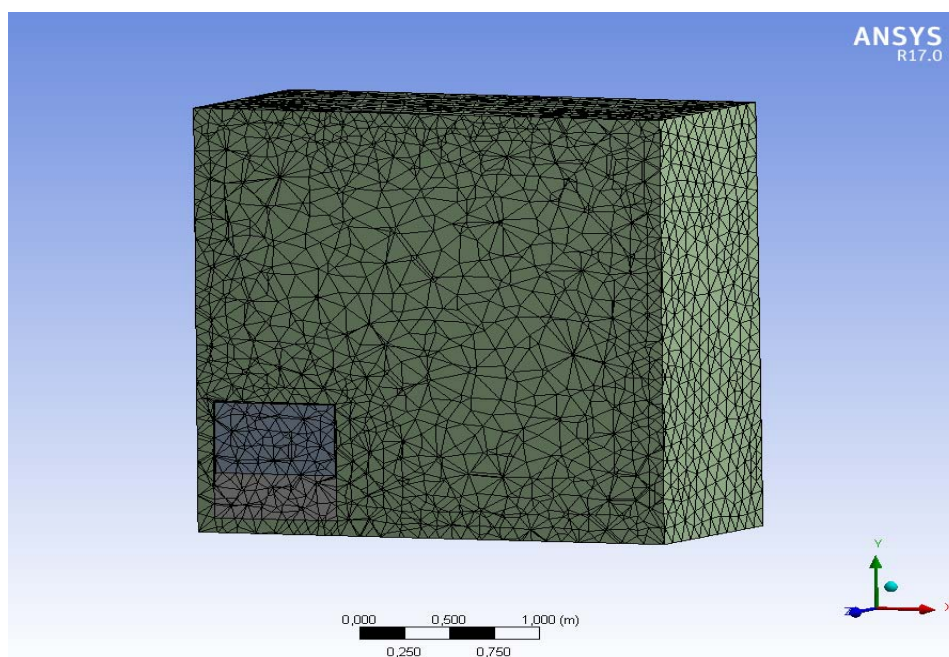


Figura 14. Mallado tridimensional generado para la simulación CFD. (Fuente: propia)

### 3.8.3. SET UP DEL MODELO EN CFX 17.0

El modelo se ha realizado en régimen transitorio, con un tiempo de duración de 30 segundos, tiempo suficiente para que se dé a cabo la deflagración y el posterior proceso de combustión regular del butano. Realizar la simulación durante más tiempo no aportaría nada significativo. El intervalo de tiempo establecido es de 0.0417 segundos, este intervalo de tiempo ha sido escogido para que se simule 24 veces por segundo, recogiendo de esa manera un video de la simulación a 24 fotogramas por segundo. Un intervalo de tiempo más corto para la simulación conllevaría mayor número de cálculos, por lo que la simulación tardaría mayor tiempo en realizarse.

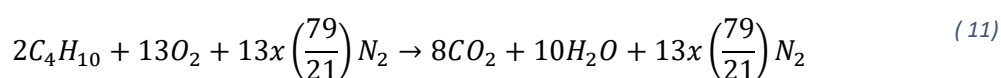
En el modelo no se han utilizado planos de simetría, puesto que la pecera no es simétrica, sino que tiene la apertura situada hacia un lateral, y el arco eléctrico situado hacia el lado opuesto. Como se ha pretendido realizar una simulación lo más parecida posible a dicho experimento, se ha considerado que no era necesario forzar un plano de simetría.

Los dominios del sistema se han dividido en 3, estando acorde a las partes divididas en la geometría del modelo, a saber: Entorno, Fluido interior y Pecera.

La pecera se ha asignado como un dominio cuyo único propósito es poner restricciones físicas a la dinámica de fluidos. Por ello, se ha diseñado como sólido isoterma cuya temperatura inicial es de 25 grados centígrados. No se ha creado ninguna interface entre el sólido y los fluidos.

Tan solo se ha creado una interface de fluido a fluido para que el fluido interior con el del entorno entren en contacto creando las condiciones previas necesarias para el fenómeno Backdraft.

La reacción que se va a llevar a cabo en la simulación es la siguiente:



Dónde dos moléculas de butano reaccionan con el aire de la cual trece moléculas son oxígeno y una parte proporcional es nitrógeno, el cual no reacciona, es un reactivo inerte, y en la reacción se utiliza como restricción.

Para simular esta reacción, se ha utilizado una de las reacciones que tiene por defecto la herramienta CFX. La reacción seleccionada ha sido "Butane Air WD1", que corresponde a la reacción Westbrook and Dryer con 1 step. Esta reacción va directamente ligada a la reacción del butano con el aire en una reacción "single step", es decir, de un solo paso, sin elementos transitorios de la combustión. El modelo EDM solo puede trabajar con reacciones de uno o dos pasos.

La reacción diseñada por CFX, impone un orden de reacción para el butano de 0,15 y un orden de reacción para el oxígeno de 1,6. Ha sido diseñada como una reacción unidireccional (de los reactivos a los productos), utilizando la expresión de Arrhenius con un Factor pre-exponencial de  $7.4 \cdot 10^{11} [s^{-1} mol^{-0.75} cm^2.25]$  y una energía de activación de 30 [kcal mol<sup>-1</sup>]. En el sistema se puede diseñar cualquier reacción de combustión, no obstante, se ha decidido utilizar la reacción que proporciona el programa, considerando que los parámetros ya están determinados y son válidos.

Al dominio de Fluido interior, así como al dominio de Entorno se ha impuesto un fluido creado para albergar dicha reacción. Para ello se ha creado un material llamado "Butane Air Mixture", el cual es definido como mezcla reactiva, con un estado termodinámico de GAS y con la reacción de "Butane Air WD1".

Este fluido se ha implementado como flotante, añadiendo de esa manera la fuerza de la gravedad al eje vertical.

En ambos dominios se han impuesto los mismos modelos de fluido. Para la transferencia de calor, se impone el modo de energía total; Para el modelo de turbulencia, como se ha explicado en el punto (3.6.1.) se ha escogido el modelo DES, con la opción de producción y disipación; Para el modelo de combustión, como se ha explicado en el punto (3.6.2.) se ha escogido el modelo EDM, con un

coeficiente de  $C_A$  de 8 y un coeficiente de  $C_B$  de -1 [ 1], lo que en el algoritmo de combustión significa que hay un exceso de material combustible. La temperatura de extinción, que es el parámetro para manipular la temperatura a la cual no hay posibilidad de que ocurra la reacción, se ha fijado a una temperatura de 500 K, ya que utilizando temperaturas más altas han surgido problemas con el modelo.

En el experimento, se realizó la fuente de ignición con un arco eléctrico potenciado por una bujía de 5000 V. En el modelo virtual, se ha introducido un “punto fuente”. Estos puntos fuente se utilizan para crear fuentes o sumideros tanto de materia como de energía por nombrar algunas variables.

Se ha impuesto una fuente de energía justo en el lugar correspondiente a la chispa del arco eléctrico, proporcionando una energía de 10000 W.

Este punto del modelo, es uno de los que más difiere con el modelo real, ya que no se puede concretar la energía liberada por el arco eléctrico, y de ese modo la energía impuesta es una aproximación.

### 3.9. COMPARACIÓN DEL MODELO VIRTUAL Y EL EXPERIMENTO REALIZADO

#### 3.9.1. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE IGNICIÓN

Para llevar a cabo la comparación del modelo, es necesario conocer las condiciones iniciales del experimento realizado, y esas variables, aplicárselas al modelo virtual de CFD. Una vez aplicadas, comprobar, si el resultado obtenido es similar a la realidad. Para ello se han tomado datos del tiempo de ignición del modelo a distintas concentraciones iniciales de gas inflamable. Así como se ha grabado en cámara térmica las corrientes de gravedad generadas por el fluido.

Las condiciones iniciales del modelo para el dominio de Fluido interno son:

- Velocidad cero en cualquier dirección.
- Presión relativa de 1 atm.
- Temperatura inicial del fluido de 15 °C
- Turbulencia de intensidad media (5%)
- Composición del fluido:

$$F_M(C_4H_{10}) = 0.262 \quad F_M(O_2) = 0.172 \quad F_M(N_2) = 0.566$$

En fracciones másicas, por lo que en fracciones molares se traduciría como:

$$n_{C_4H_{10}} = 0.15 \quad n_{O_2} = 0.1785 \quad n_{N_2} = 0.6715$$

Las condiciones iniciales del modelo para el dominio de Entorno son:

- Velocidad cero en cualquier dirección
- Presión relativa de 1 atm.
- Temperatura del fluido de 25 °C
- Turbulencia de intensidad media (5%)
- Composición del fluido:

$$F_M(C_4H_{10}) = 0 \quad F_M(O_2) = 0.233 \quad F_M(N_2) = 0.767$$

En fracciones másicas, por lo que en fracciones molares se traduciría como:

$$n_{C_4H_{10}} = 0 \quad n_{O_2} = 0.21 \quad n_{N_2} = 0.79$$

Para conocer el tiempo de ignición del modelo virtual se ha monitorizado el punto de la fuente de energía, el cual debe convertirse en el punto de ignición. Se ha monitorizado la fracción molar de butano en ese punto concreto, al llegar al límite superior de inflamabilidad se produce la deflagración simulando el fenómeno Backdraft.

La combustión según el modelo EDM puede no llevarse a cabo por 2 motivos, que no se haya alcanzado la temperatura de extinción, o que se haya impuesto un retardo de la ignición en el parámetro “ignition delay”.

La temperatura de extinción se ha fijado en 500 K y al imponerse una fuente de 10000 W, se alcanza en cuestión de segundos. Habiendo monitorizado el punto de ignición, se escoge el tiempo para el cual se ha alcanzado el límite superior de inflamabilidad (8,4%).

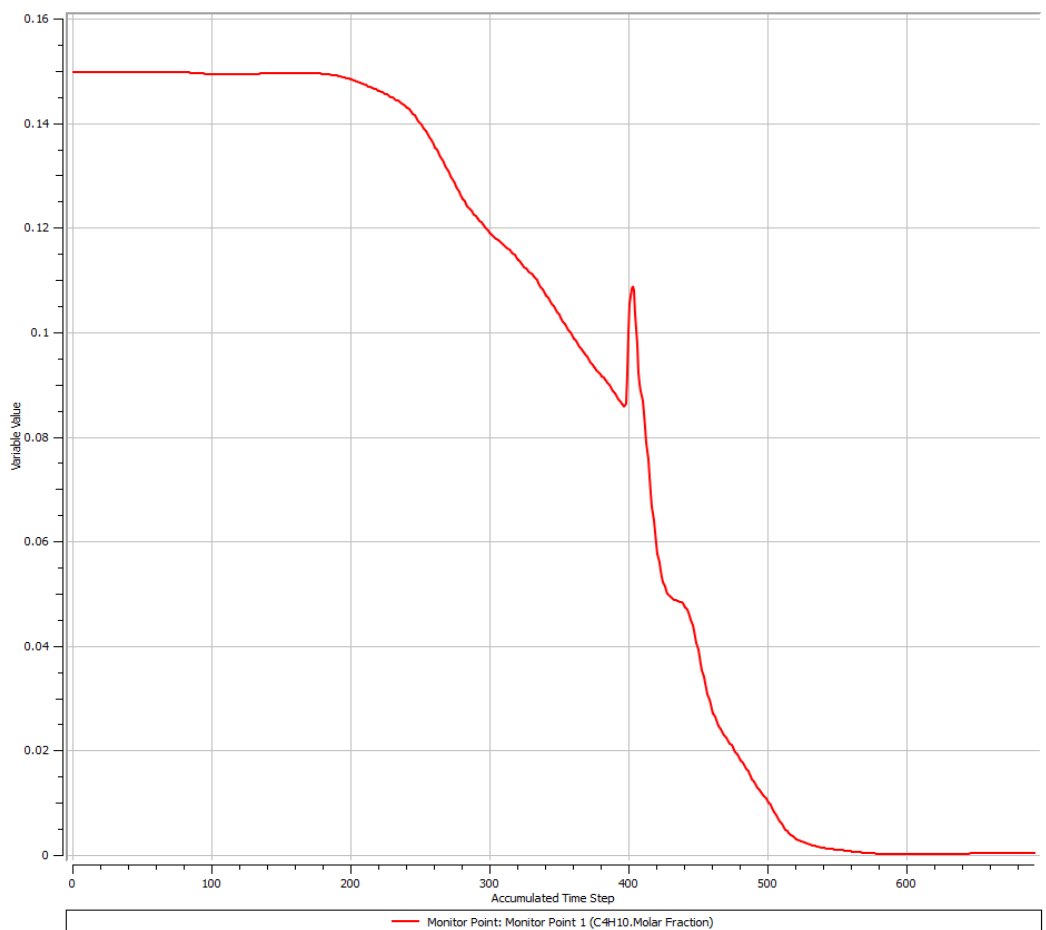


Figura 15. Momento de la ignición del modelo CFD (fracción molar vs. timestep). (Fuente: propia)

Tal y como se observa en la Figura 15, el segundo 16,7 es el momento en el cual se ha alcanzado el límite superior de inflamabilidad en el punto monitorizado, por lo que a partir del segundo 16,7 se puede generar la deflagración. De esa manera, se le impone al sistema que tenga un retardo de 16,7

segundos en la ignición, y a partir de ese momento, según el modelo de combustión se puede generar la deflagración o no.

Tabla 5. Validación de tiempos de ignición. (Fuente: propia)

Experimento	Concentración (% en vol.)	Tiempo de ignición (s)
1	15	70
2	11.5	57.9
3	10.9	53.9
4	10.5	5.3
5	9.5	0
6	9.5	0
7	9	26
Simulación numérica	15	16.712

Como se ha comentado previamente en el punto (3.3.2) los experimentos son irrepetibles, y en ciertas ocasiones se produjo la deflagración de manera instantánea. No obstante, si se observa a continuación los resultados de la simulación, se comprende que a través de la fuente de calor (en la simulación una fuente de energía de 10000 W y en el experimento un arco eléctrico) se cumple un tiempo de ignición, ya que es el que provoca que el gas inflamable del interior de la pecera tenga mayor o menor densidad que el aire del entorno. Por el comportamiento de la simulación, se considera que el tiempo de ignición tiene validez.

La simulación se llevó a cabo en 7 horas, 18 minutos y 6,109 segundos. Ocupando un total de 8,08 GB.

Los resultados se visualizan con la herramienta CFD-Post.

### 3.9.2. VISUALIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE GRAVEDAD

A continuación, se muestran las figuras recogidas en la simulación numérica por CFD del fenómeno Backdraft en el acuario de laboratorio de bomberos, en dichas figuras se representa la concentración de butano. Se comparan con las figuras recogidas en el experimento número 1 tomadas por la cámara térmica.

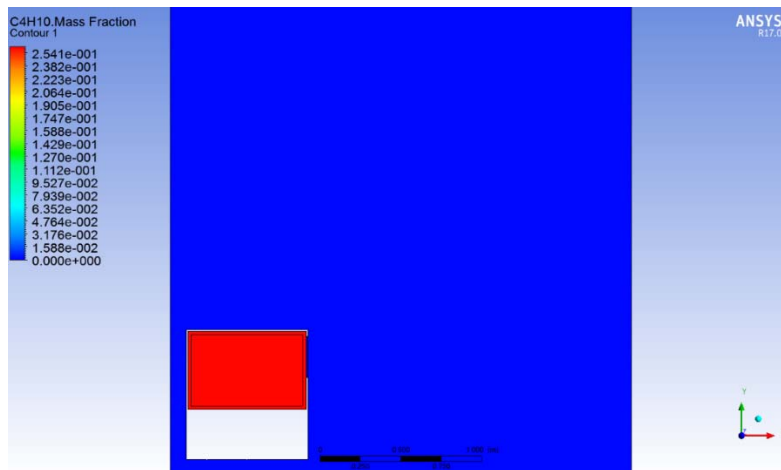


Figura 16. Plano de la puerta en el segundo 0 (Concentración de butano). (Fuente: propia)

En primer lugar, hay una concentración muy alta de butano en la pecera. Lo predecible es que al ser el butano más pesado y estar inicialmente más frío salga por la puerta cayendo hacia abajo.

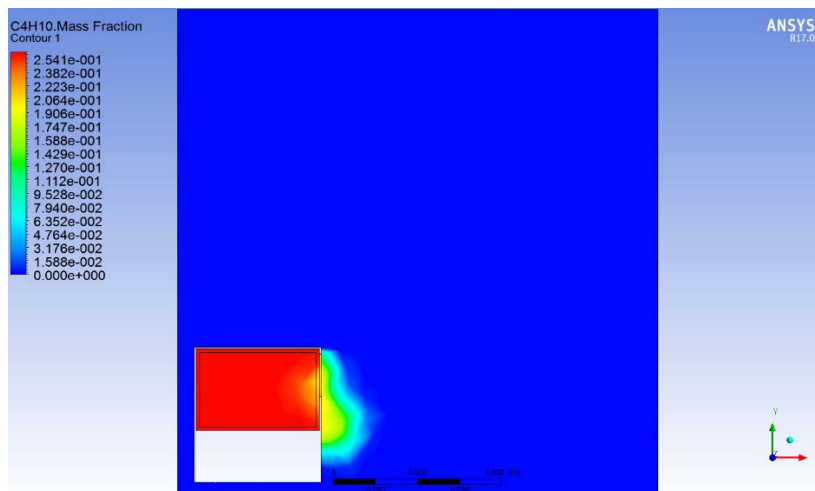


Figura 17. Plano de la puerta en el segundo 1,512 (Concentración de butano). (Fuente: propia)

El comportamiento de la simulación tanto en el momento del Backdraft como previo a este, se asemeja en gran medida con lo captado por la cámara térmica.

Como se observa en la Figura 18, la cámara térmica refleja la temperatura en el cristal de la pecera, por lo que solo se puede observar la corriente de gravedad en la puerta de la pecera. En el momento que se abre la puerta, el butano tiende a caer hacia abajo.

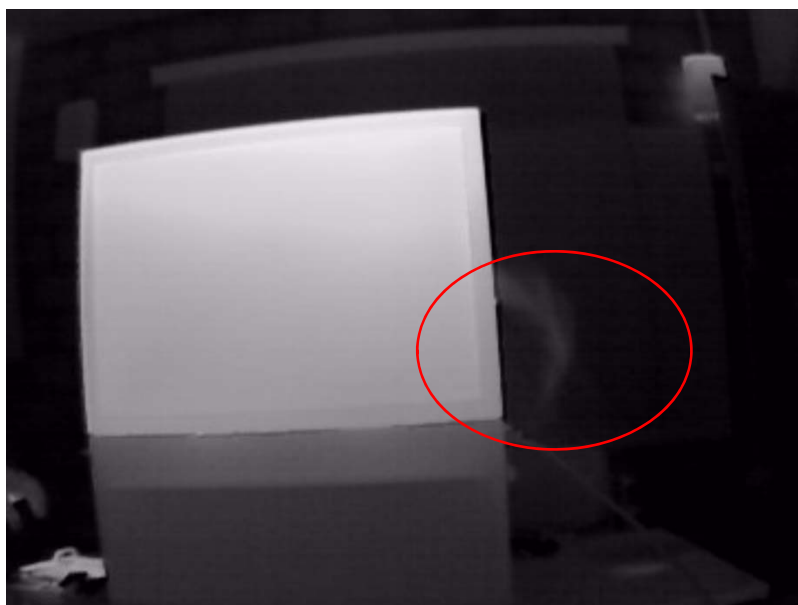


Figura 18. Imagen de la cámara térmica en el momento que se abre la puerta del experimento 1. (Fuente: propia)

Gracias a la fuente de energía que está calentando, al igual que el arco eléctrico en el modelo real, la corriente de gravedad cambia de sentido una vez el fluido interior alcanza menor densidad que la propia del aire.

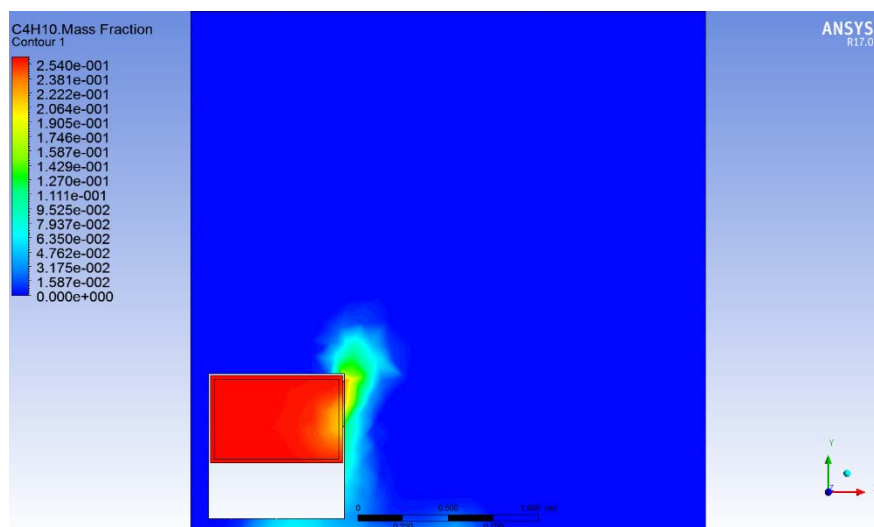


Figura 19. Plano de la puerta en el segundo 4,872 (Concentración de butano). (Fuente: propia)

El gas inflamable que está dentro de la pecera tiende a subir, y el aire frío crea una corriente de gravedad por la parte inferior. En el modelo numérico sucede a partir del segundo 4,872.

En el modelo real, el arco eléctrico calienta menos que la fuente de energía impuesta en el modelo de CFD, por lo que tarda más en cambiar el sentido de las corrientes de gravedad y, en consecuencia, un tiempo de ignición más largo. A partir del segundo 20 cambia el sentido de la corriente de gravedad, el butano ya empieza a salir por arriba de la pecera.



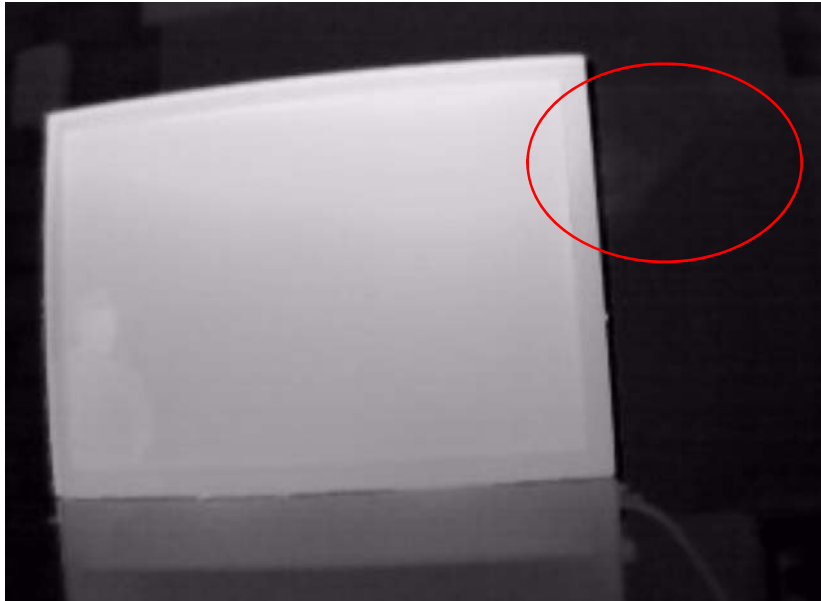


Figura 20. Imagen de la cámara térmica en el segundo 29. (Fuente: propia)

Tras haber cambiado el sentido de la corriente de densidades y haber transcurrido unos segundos, se ha creado una corriente de gravedad lo suficientemente turbulenta como para haber rebajado la concentración de butano al límite superior de inflamabilidad.

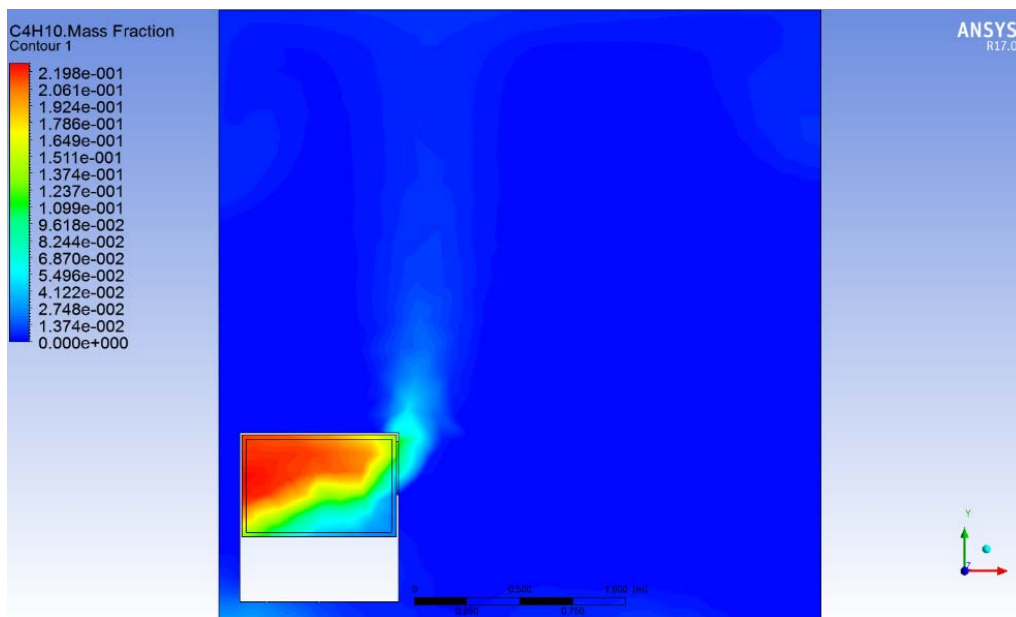


Figura 21. Plano de la puerta en el segundo 16,674 (Concentración de butano). (Fuente: propia)

Se comprende que la dinámica de fluidos de la corriente de gravedad es muy similar entre el modelo virtual y el real. La única diferencia es la velocidad que toman debido a la diferencia de fuentes de calor.

### 3.9.3. VISUALIZACIÓN DE LA IGNICIÓN

En el modelo real no se puede observar el punto de ignición con la cámara térmica, ya que el cristal no permite ver la temperatura de la fuente de ignición, no obstante, se puede observar con una cámara de vídeo.

El experimento número 4 fue grabado tanto en cámara térmica como en cámara de vídeo.



Figura 22. Imagen de la cámara de vídeo en el experimento 4, momento de la deflagración. (Fuente: propia)

Se observa que en la Figura 22, el punto de ignición es justo encima del arco eléctrico, donde los gases están muy calientes.

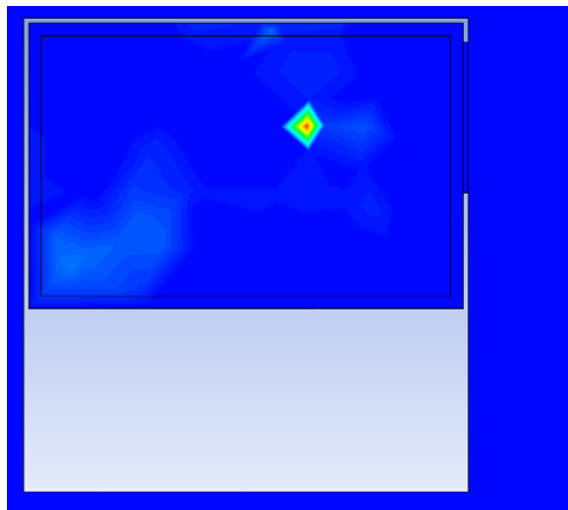


Figura 23. Concentración CO2 en el segundo 16,716. (Fuente: propia)

En la Figura 23, se comprende que el punto de ignición es el mismo en la simulación numérica que en el experimento realizado.

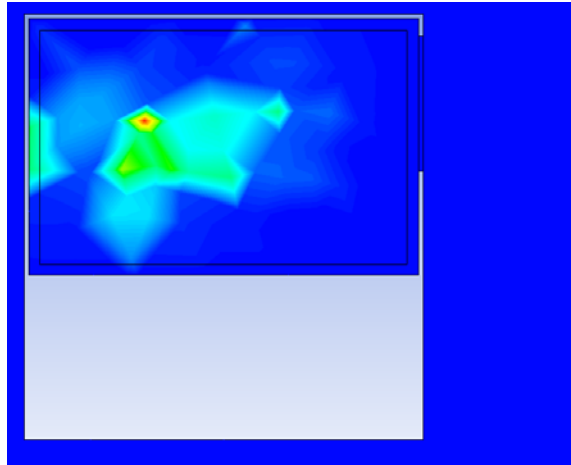


Figura 24. Concentración CO2 en el segundo 16,758. (Fuente: propia)

La reacción se produce en escasas milésimas de segundo, y gracias a la simulación numérica, se puede comprender la dinámica de fluidos que deriva de la deflagración.

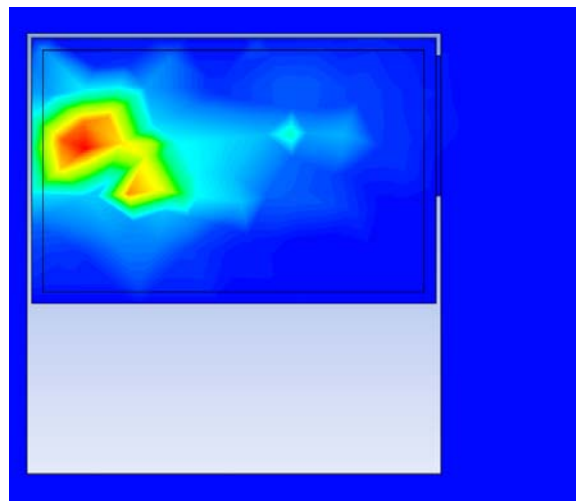


Figura 25. Concentración CO2 en el segundo 16,8. (Fuente: propia)

Cuando los productos generados de la combustión ocupan más lugar que el volumen del recinto que los ocupa, tienden a salir a mayor velocidad, dando lugar a la bola de fuego propia del Backdraft.

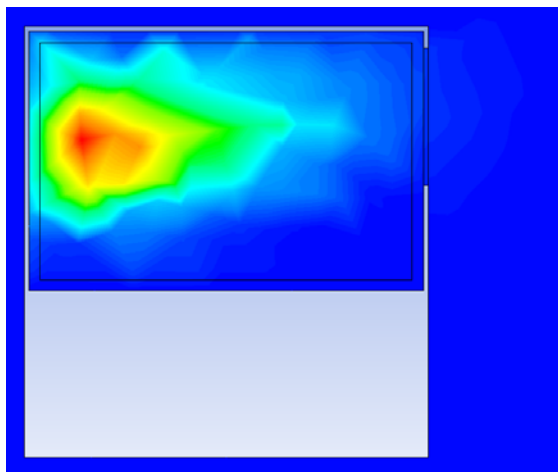


Figura 26. Concentración CO2 en el segundo 16,842. (Fuente: propia)

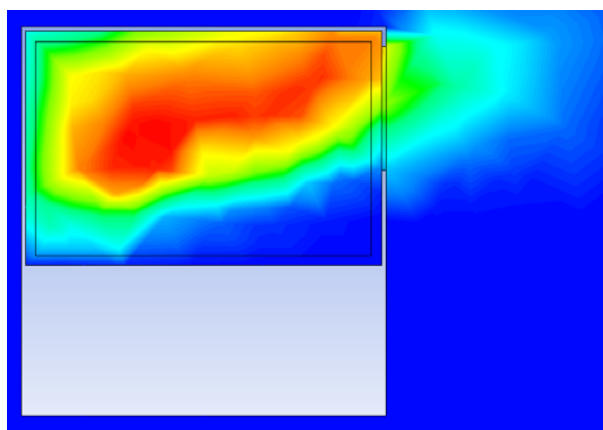


Figura 27. Concentración CO2 en el segundo 17,094. (Fuente: propia)

La deflagración en el modelo CFD se comporta de la misma manera que la deflagración del modelo real.

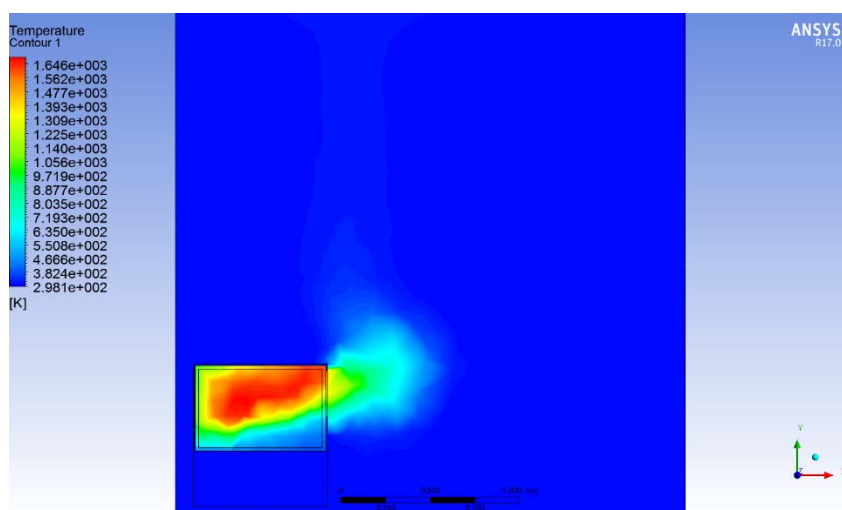


Figura 28. Plano de la puerta en el segundo 17,094 (Temperatura), momento del Backdraft. (Fuente: propia)

Aunque no se haya podido grabar con la cámara térmica la dinámica de fluidos dentro del recinto en el momento de la deflagración, sí que se pueden comparar los modelos con la bola de fuego consecuente a esta.

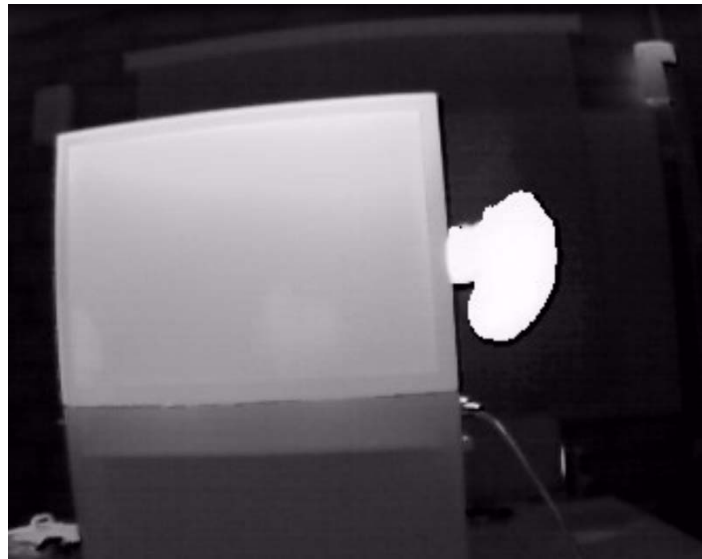


Figura 29. Imagen del Backdraft del experimento 1 (segundo 70). (Fuente: propia)



Figura 30. Imagen del Backdraft del experimento 1 (segundo 70,5). (Fuente: propia)

En la Figura 29 y 30 se observa que la bola de fuego característica del Backdraft captada por la cámara térmica se comporta de la misma manera que en la Figura 28, donde se muestra la imagen térmica de la simulación numérica en el momento del Backdraft.

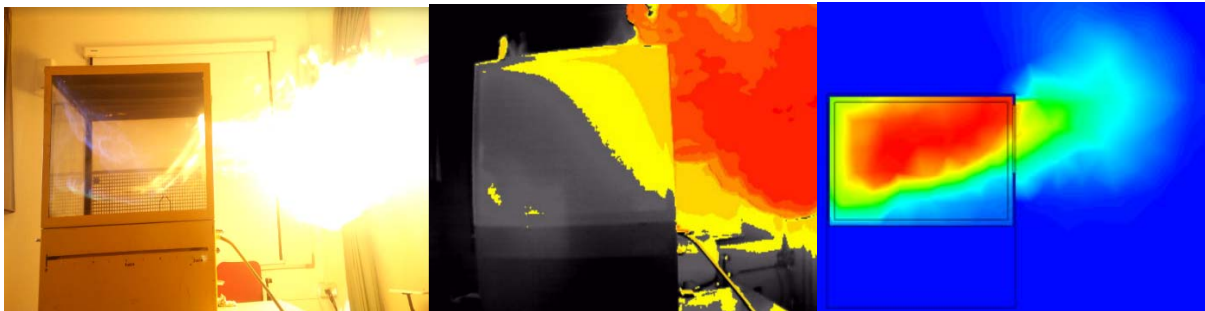


Figura 31. Imagen del experimento 4 en el momento del Backdraft. (Fuente: propia)

En la Figura 31 se comparan las imágenes de la bola de fuego grabadas en cámara de vídeo y cámara térmica con simulación numérica con CFD.

### 3.10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Hasta el momento, se ha realizado el modelo virtual, y se ha comparado con el experimento realizado en el acuario de laboratorio de bomberos. Comprobando que, el modelo en CFD se asemeja al comportamiento real del fenómeno tanto en la dinámica de fluidos de la corriente de gravedad como en la ignición.

Gracias a esta comparación, podemos comprender que los resultados extraídos de la simulación pueden ser analizados y estudiados con detenimiento para mayor comprensión del comportamiento del fenómeno Backdraft.

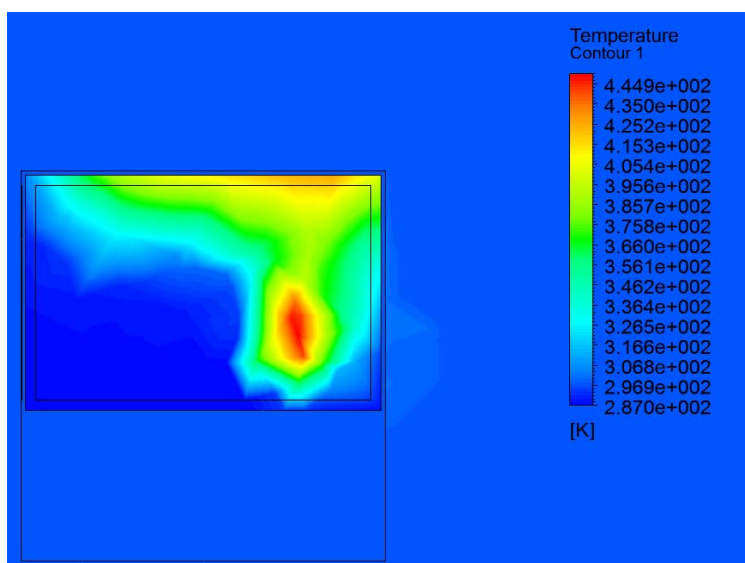


Figura 32. Plano de la fuente de ignición en el segundo 1.512 (Temperatura). (Fuente: propia)

En la Figura 32 se observa como el punto de ignición se encuentra a 449K. En el segundo 1,512 el butano todavía es más denso que el aire que se encuentra en el entorno, por lo que tiende a ir hacia abajo. Es gracias a esta fuente de calor que, la densidad del producto inflamable en el interior de la pecera puede ser menor que el del ambiente, cambiando el sentido de la corriente de gravedad

Los gases inflamables superan la densidad del aire, tendiendo a salir de la pecera por arriba.

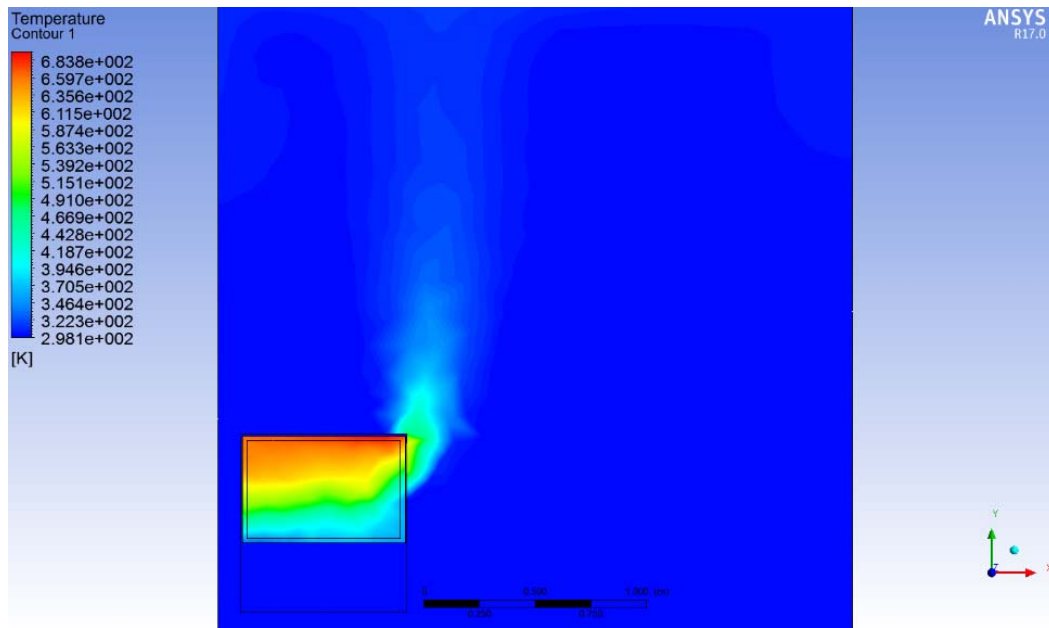


Figura 33. Plano de la puerta en el segundo 16,674 (Temperatura). (Fuente: propia)

Cambiando de plano en la Figura 33, se observa como milésimas de segundo antes de provocarse la ignición, los gases inflamables calientes tienden a subir, observándose de manera muy gráfica la corriente gravitacional del aire frío entrando en la pecera. En la Figura 33 parece que la zona más caliente es la parte superior, donde tienden a subir los gases calientes, pero sin embargo es la fuente de energía impuesta al sistema, que no se encuentra en el mismo plano que la apertura (como se muestra en la Figura 32).

Gracias a la simulación numérica se pueden analizar las variables físicas presión, temperatura y velocidad. A continuación, se muestran durante la corriente de gravedad en el segundo 15,036, segundos antes a la deflagración y en el segundo 16,842 momento álgido de la deflagración.

- Presión:

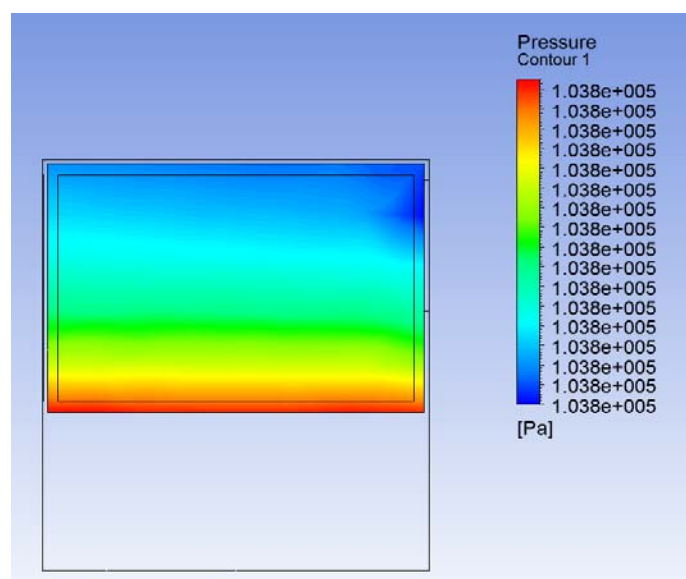


Figura 34. Presión en el interior de la pecera en el segundo 15,036. (Fuente: propia)

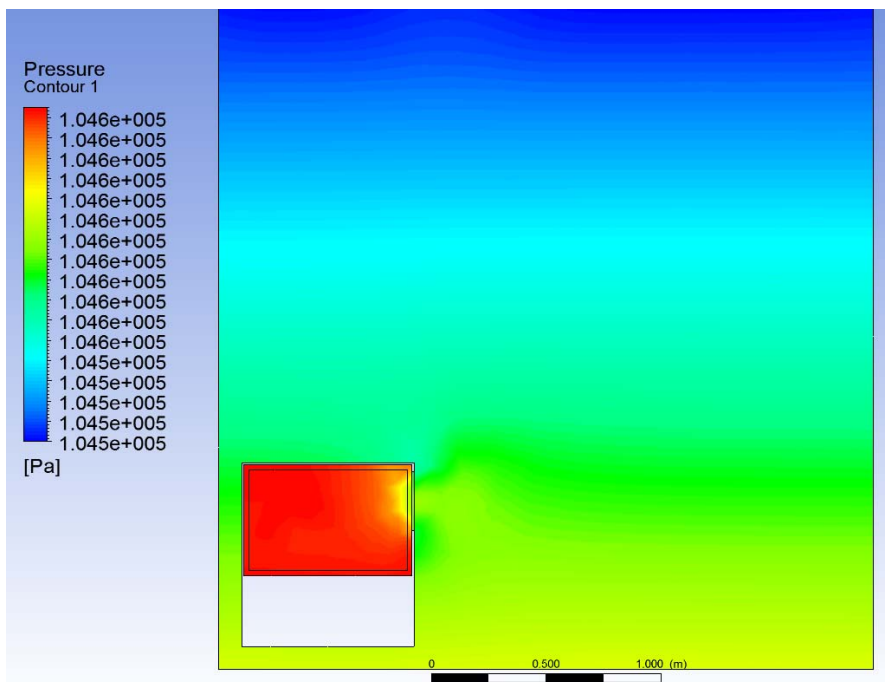


Figura 35. Presión en el sistema en el segundo 16,842. (Fuente: propia)

La presión durante la corriente de gravedad no varía mucho, siendo el punto de mayor presión el que soporta el fluido de mayor densidad con una magnitud de 103812 pascales, habiendo un gradiente de presiones de apenas 39 pascales.

En el momento de la deflagración, los gases en combustión ejercen presión en el interior de la pecera, de modo que se deben expulsar los gases hacia el exterior, siendo el punto de mayor presión de 104591 pascales con un gradiente de 56 pascales.

La sobrepresión alcanzada en la simulación del Backdraft es moderadamente baja, puesto que se imita un ensayo controlado. En un Backdraft de un incendio real, se alcanzarían magnitudes mayores.

- Velocidad:

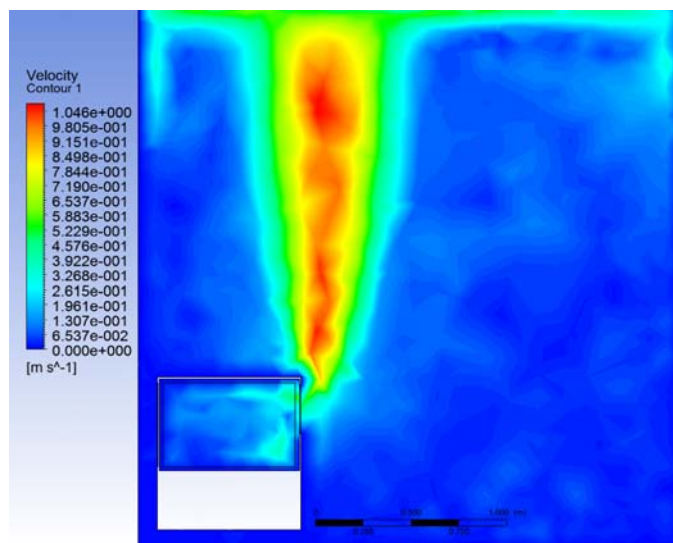


Figura 36. Velocidad del modelo en el segundo 15,036. (Fuente: propia)



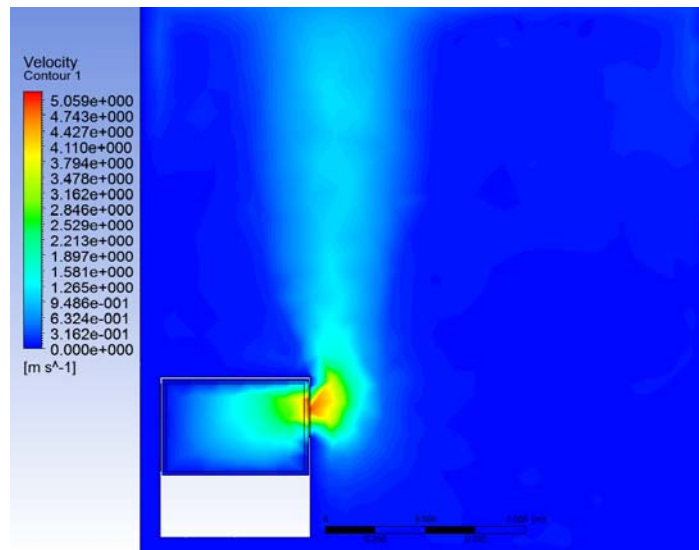


Figura 37. Velocidad del modelo en el segundo 16,842. (Fuente: propia)

La velocidad alcanzada en el interior de la pecera durante la corriente de gravedad está alrededor de los 0,65 metros por segundo, mientras que la columna de gas caliente que sale por la apertura del recinto se mueve a 1,078 metros por segundo.

Por otra parte, en el momento de la deflagración, se alcanza una velocidad de 4,86 metros por segundo en la apertura del recinto. Se puede decir que es la velocidad alcanzada por el frente de llama.

- Temperatura:

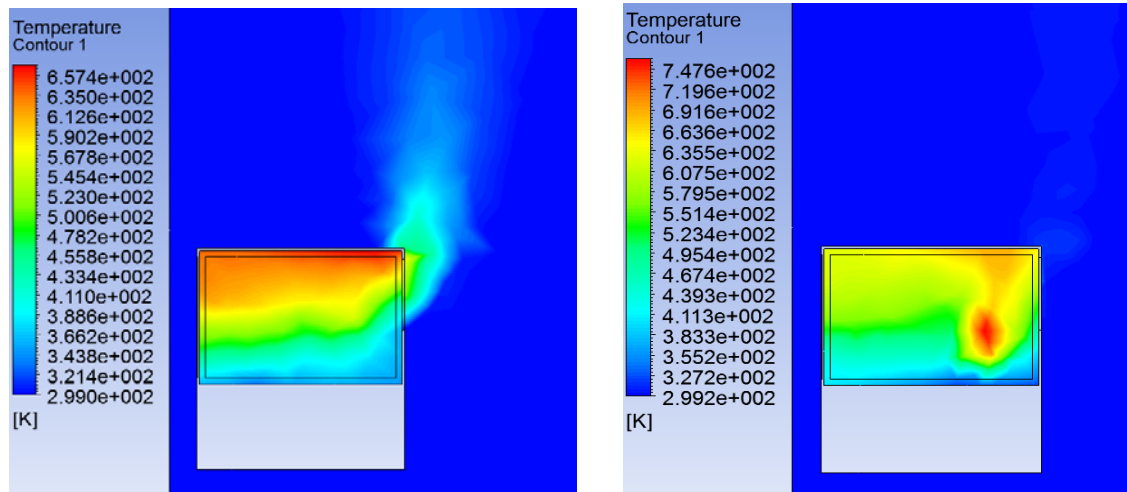


Figura 38. Temperatura del modelo en el segundo 15,036 en el plano de la puerta y de la fuente de ignición. (Fuente: propia)

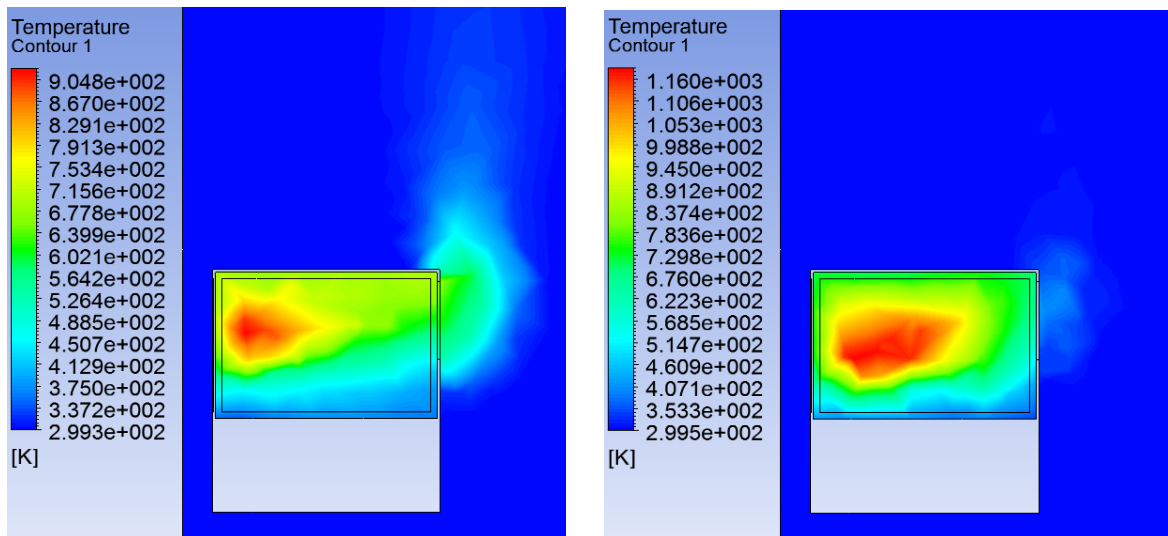


Figura 39. Temperatura del modelo en el segundo 16,842 en el plano de la puerta y de la fuente de ignición. (Fuente: propia)

Durante la corriente de gravedad, hay mucha diferencia entre observar el plano de apertura del recinto y observar el plano de la fuente de calor. A la izquierda se sitúa el plano de la puerta, donde se aprecia la corriente de gravedad, y los gradientes de temperatura entre el gas caliente del recinto y el aire frío que entra por debajo. A la derecha se aprecia cómo la fuente de energía calienta los gases del recinto, creando puntos favorables para la deflagración. En la fuente de calor, tras 15 segundos de liberación de energía, imitando el arco eléctrico del experimento realizado, se encuentra a 747 grados kelvin. Por consecuencia, los gases alrededor de la apertura del recinto se encuentran entre 400 y 600 kelvin.

En la Figura 39, se observa a la derecha cómo la combustión que ha comenzado en la fuente de calor ocupa el espacio del recinto, mientras que a la izquierda se aprecia cómo tiende a salir por la apertura del recinto. La temperatura máxima alcanzada en el momento de la deflagración es de 1160 kelvin, no obstante, la temperatura máxima del proceso de deflagración es en el segundo 17,094 de 1650 kelvin.

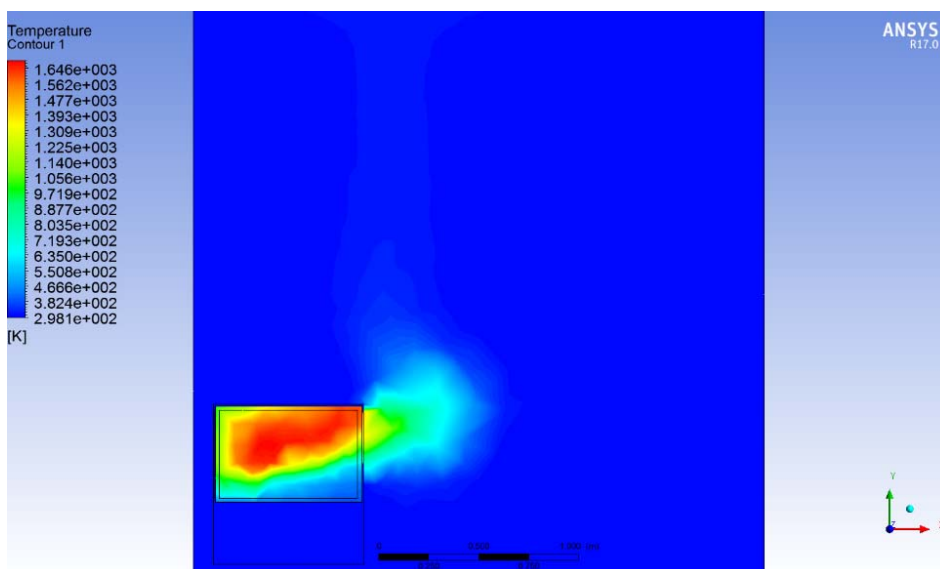


Figura 40. Plano de la puerta en el segundo 17,094 (Temperatura), momento del Backdraft. (Fuente: propia)

### 3.11. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN

Distintos autores han realizado un estudio basado en la simulación numérica del Backdraft, pero ninguna lo suficientemente rigurosa como para poder realizar el escenario completo del Backdraft.

Todavía queda muchísimo por trabajar en el tema de ingeniería de protección contra incendios utilizando herramientas de CFD, pero no cabe duda que es una de las medidas más prometedoras en dicho campo.

Los modelos de combustión de los actuales programas de CFD, no están lo suficientemente avanzados como para poder describir de manera 100% rigurosa el escenario Backdraft. Esto es debido a que dichos modelos de combustión, no consideran ciertas variables necesarias para simular dicho fenómeno, que son: el rango de inflamabilidad de un combustible, el nivel de pre-mezcla necesario en la corriente de gravedad para realizar la mezcla inflamable y la temperatura de ignición de dichos gases.

En este documento, para poder realizar un modelo válido, estos impedimentos se han resuelto de la siguiente manera:

- Se ha monitorizado la fuente de ignición para tomar el valor de la fracción molar de combustible para conocer el tiempo necesario para alcanzar el límite superior de inflamabilidad y consecuentemente se ha impuesto dicho tiempo como una variable de autoignición.
- Se ha visualizado la velocidad generada en la corriente de gravedad y se ha considerado suficiente para que combustible y comburente lleguen a formar una mezcla inflamable.
- Se ha considerado una temperatura de ignición de los gases en consecuencia de la energía de activación de la reacción de combustión (según las reacciones intrínsecas del CFX para el metano o el monóxido de carbono).

Por todo ello, se considera que se ha diseñado un modelo válido del fenómeno Backdraft mediante herramientas CFD, con el programa CFX de ANSYS.

## Capítulo 4. Aplicaciones del modelo virtual en ingeniería de protección contra incendios.

### 4.1. INTRODUCCIÓN DE LAS APLICACIONES

Los modelos CFD se pueden utilizar como herramienta de diseño para seguridad preventiva con muchas finalidades, entre ellas, el diseño eficiente de edificaciones.

En la actualidad, ya existen empresas que utilizan programas de CFD para realizar estudios de seguridad y prevención contra incendios, realizando simulaciones y observando la evolución del fuego según la geometría o materiales de la edificación en el puesto de trabajo. Así como empresas que se dedican al peritaje de accidentes, utilizan simulaciones por CFD para reproducir el suceso.

El modelo diseñado en la pecera, el cual se ha comparado con el experimento realizado y ha adquirido cierta validez, se puede extrapolar a otras geometrías para realizar una simulación del Backdraft con cualquier tipo de fin.

### 4.2. FIN ANALÍTICO: VISUALIZACIÓN DEL FENÓMENO BACKDRAFT

Una de las aplicaciones es la formación de las dotaciones de bomberos para actuar en incendios de ventilación reducida, en los cuales puede existir el Backdraft.

El consorcio de bomberos de valencia se encarga de realizar cursos de formación, en los que realizan un incendio en un contenedor de 2,5 x 2,5 x 6 metros, en el cual se abre una ventana cuadrada de un metro de lado. Para mayor información consultar el documento Planos.



Figura 41. Simulación real de Backdraft en un incendio en recinto confinado. (Fuente: Consorcio Provincial de Bomberos)



Figura 42. Bola de humo a consecuencia del Backdraft. (Fuente: Consorcio Provincial de Bomberos)

Estos ensayos pueden simularse en CFD para observar a fondo el fenómeno, observando qué es lo que sucede dentro del contenedor.

Con el modelo realizado, adaptando la geometría a la del contenedor y cambiando las condiciones iniciales a gases producto de combustión (principalmente CO y CO<sub>2</sub>).

Las condiciones iniciales han sido estudiadas dependiendo del tiempo que tarda en producirse la deflagración en el incendio reproducido en las Figuras 41 y 42. En dicho incendio se tardan 16 segundos en ocurrir la deflagración.

Teniendo en cuenta que los productos de combustión dentro del incendio son impredecibles, se han hecho aproximaciones. De manera que tarde 16 segundos en entrar en el rango de inflamabilidad superior. Monitorizando el punto de ignición igual que en la Figura 15, pero esta vez a la inversa. En vez de utilizar unas condiciones iniciales dadas para obtener el tiempo de ignición, se ha utilizado el tiempo de ignición para obtener una aproximación de las condiciones iniciales.

- Fuente de ignición de 100000 W imitando un material incandescente que puede provocar la deflagración.
- Aire frío para el exterior (1 atm, 5°C)
- Gases de combustión en el interior (1.3 atm, 527°C)

$$F_M(CO) = 0.5 \quad F_M(CO_2) = 0.25 \quad F_M(H_2O) = 0.1$$
$$F_M(O_2) = 0.0233 \quad F_M(N_2) = 0.0767$$

Los demás parámetros están configurados del mismo modo que los programados en la pecera.

- Corriente de gravedad:

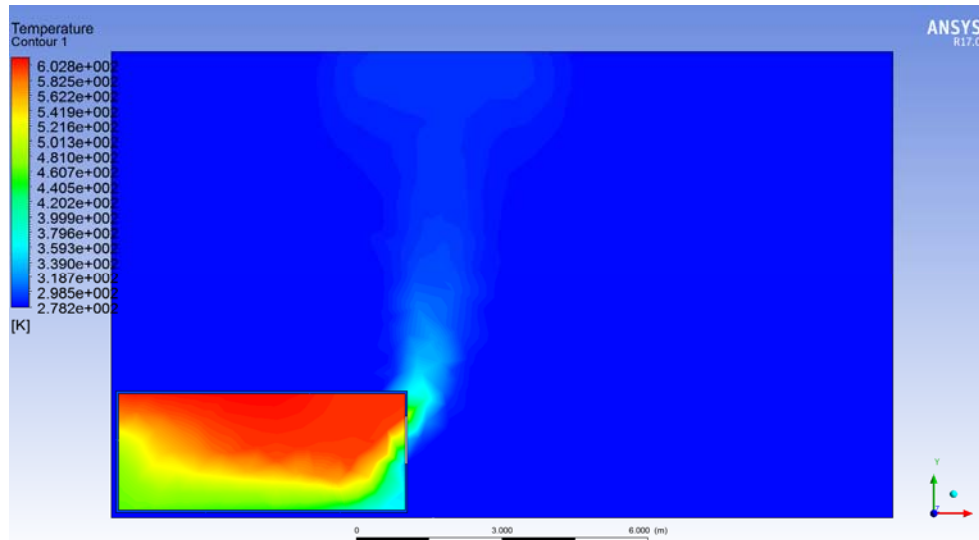


Figura 43. Corriente de gravedad en simulación CFD (temperatura) de bomberos. (Fuente: propia)

La Figura 43 comprende la corriente de gravedad previa al Backdraft como en la Figura 41. Durante la corriente de gravedad se alcanzan velocidades realmente altas.

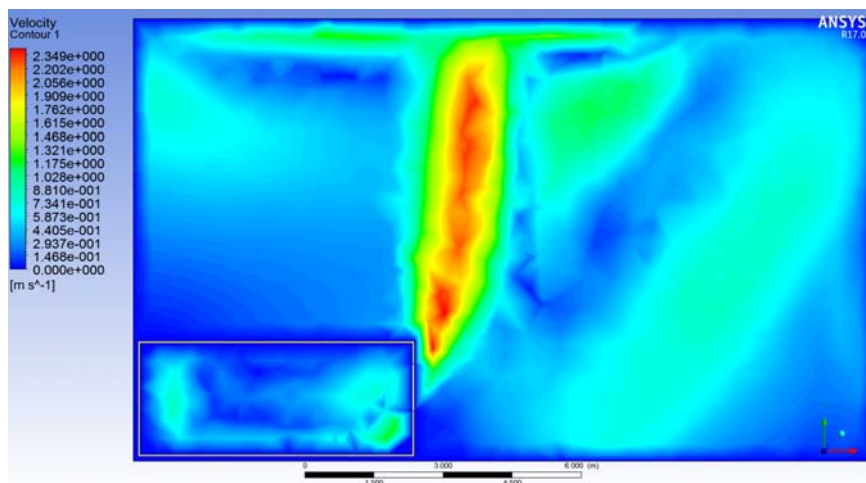


Figura 44. Corriente de gravedad en simulación CFD (velocidad). (Fuente: propia)

En la columna de humo que sale hacia el exterior, al igual que en la Figura 41, se alcanzan velocidades de alrededor de 2,3 metros por segundo. Mientras que en el interior del contenedor se alcanzan velocidades de 1,2 metros por segundo justo debajo de la apertura, donde hay mayor turbulencia.

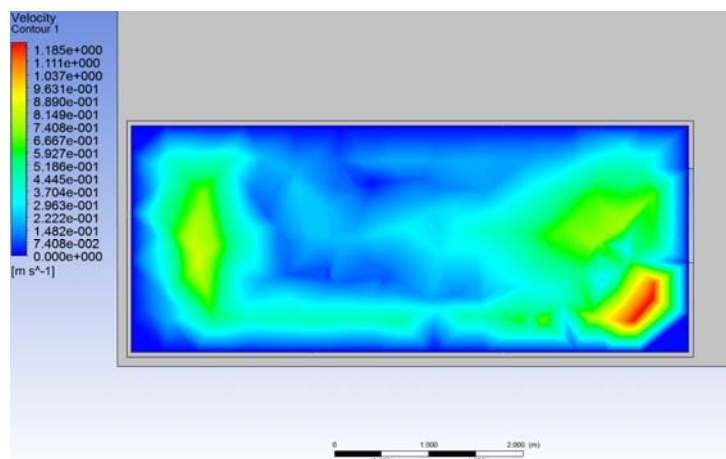


Figura 45. Velocidad en el interior del contenedor durante la corriente de gravedad. (Fuente: propia)

La velocidad alcanzada en el punto de mayor turbulencia, se debe al gradiente de densidades generado por la diferencia de temperatura entre el humo y el aire frío.

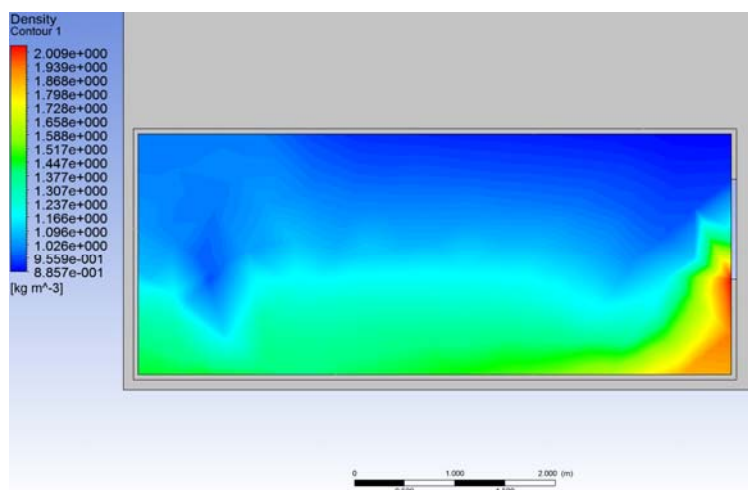


Figura 46. Densidad en el interior del contenedor durante la corriente de gravedad. (Fuente: propia)

Como se observa en la Figura 46, justo debajo de la apertura del contenedor la densidad ronda una magnitud de 2,044 kilogramos por metro cúbico. Habiendo un gradiente de densidades de 1,158 kilogramos por metro cúbico entre el punto más denso y el menos denso, es decir, entre el punto más frío y el más caliente.

- Momento de la deflagración:

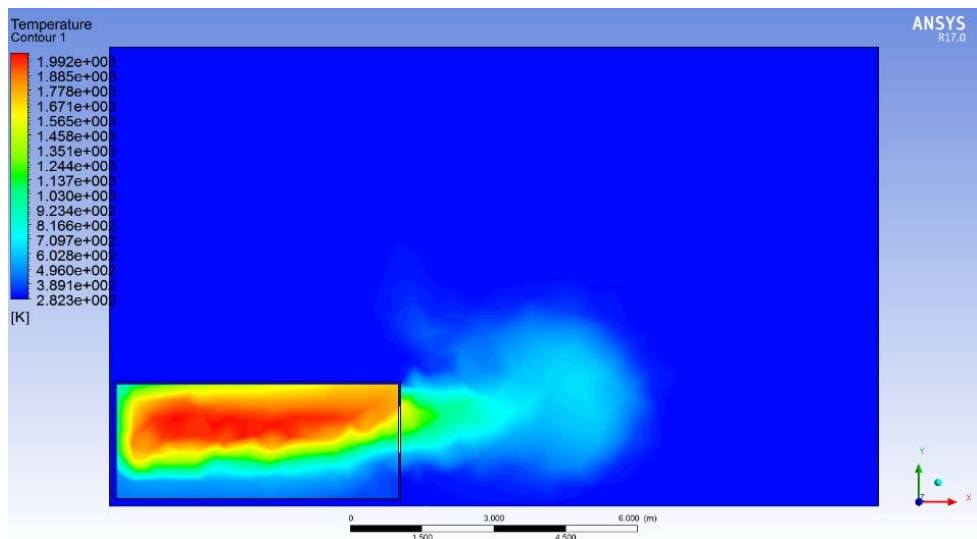


Figura 47. Backdraft simulado por CFD. (Fuente: propia)

En la Figura 47 se observa el momento de la deflagración y una bola de humo de aproximadamente 5 metros al igual que en la Figura 42.

La temperatura que se alcanza en la deflagración simulada en la Figura 47 es de aproximadamente 2000 grados kelvin, que en comparación con la simulación de la pecera en la Figura 40 es de 350 grados más de temperatura.

También se puede caracterizar la velocidad del frente de llama.

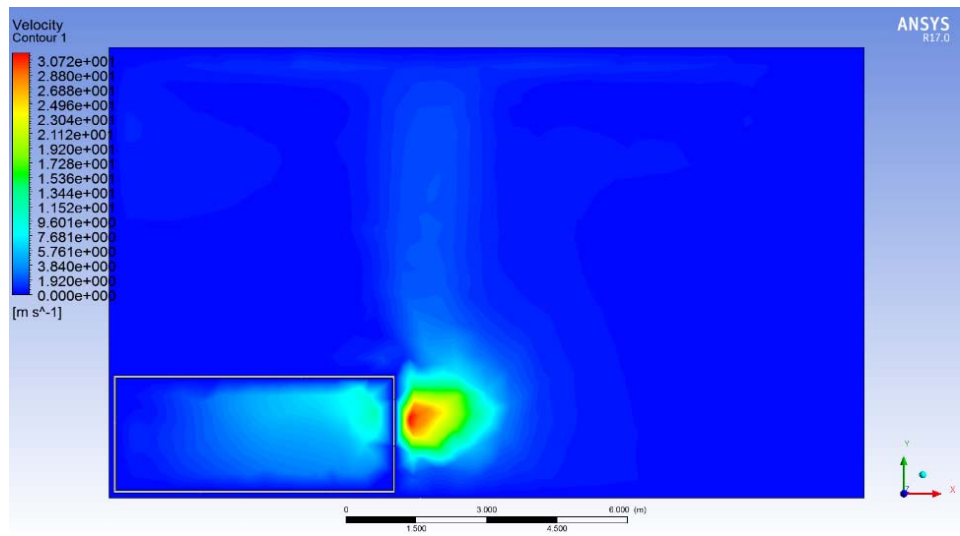


Figura 48. Velocidad en el momento del Backdraft. (Fuente: propia)

En la Figura 48, la velocidad alcanzada por el frente de llama ronda los 31 metros por segundo. La velocidad alcanzada en esta simulación se aproxima mucho a la que se podría observar en un incendio de vivienda donde ocurriese el fenómeno Backdraft. En comparación con la Figura 37, que apenas son 5 metros por segundo, la deflagración ha sido aproximadamente 6 veces superior.



La sobrepresión alcanzada durante la deflagración también se encuentra a mayor escala que la de la Figura 35.

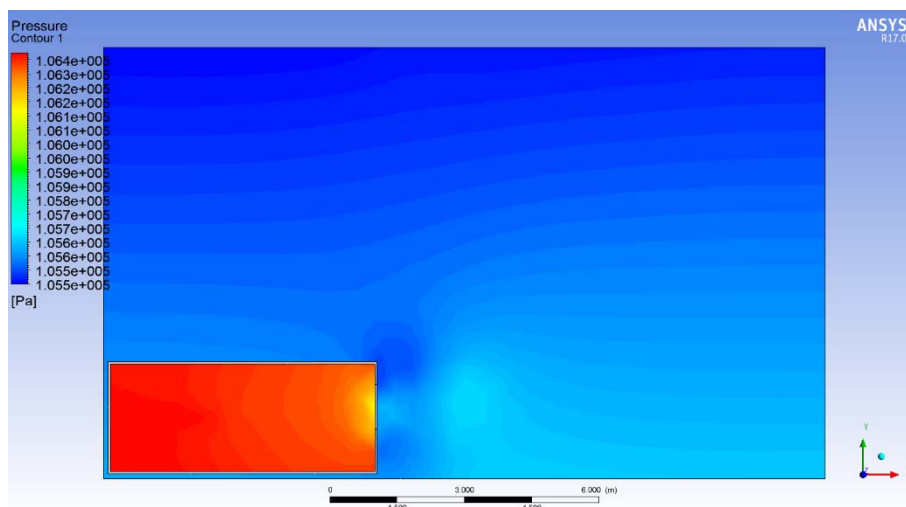


Figura 49. Presión en el momento del Backdraft. (Fuente: propia)

En la Figura 49, el momento álgido de la deflagración, se encuentra una sobrepresión de 106311 pascales, con un gradiente de presiones de 795 pascales. Se comprende entonces que, en un Backdraft a escala real, sí que se pueden observar sobrepresiones de mayor magnitud, como las que se encontrarían en un Backdraft real.

#### 4.3. DISEÑO DE SEGURIDAD PREVENTIVA

Una vez estudiado y analizado el comportamiento del fenómeno Backdraft, lo lógico es prever desde medidas de seguridad que se cree dicha situación. Y es dónde entra en juego el diseño asistido por ordenador.

Utilizando el mismo ejemplo del contenedor de bomberos, gracias a las herramientas de simulación se puede diseñar en poco tiempo un sistema de ventilación óptimo para que un incendio no suponga un posible escenario de Backdraft.

Para realizar dicho modelo de seguridad, se ha supuesto un incendio de una fuga de gas natural en la parte baja del contenedor, de un caudal de 0.05 kilogramos por segundo con una fuente de ignición de 5000 vatios.

Se trata de observar la evolución de un incendio, el cual, a falta de oxígeno, contendría un gas combustible además de gases productos de combustión como el monóxido de carbono que también es inflamable.

Es un claro ejemplo de un escenario de un recinto confinado en el cual, a falta de ventilación se puede generar un backdraft.

Los diseños CAD permiten modelar la geometría del confinamiento para realizar una ventilación óptima sin necesidad de maquetas o prototipos costosos.

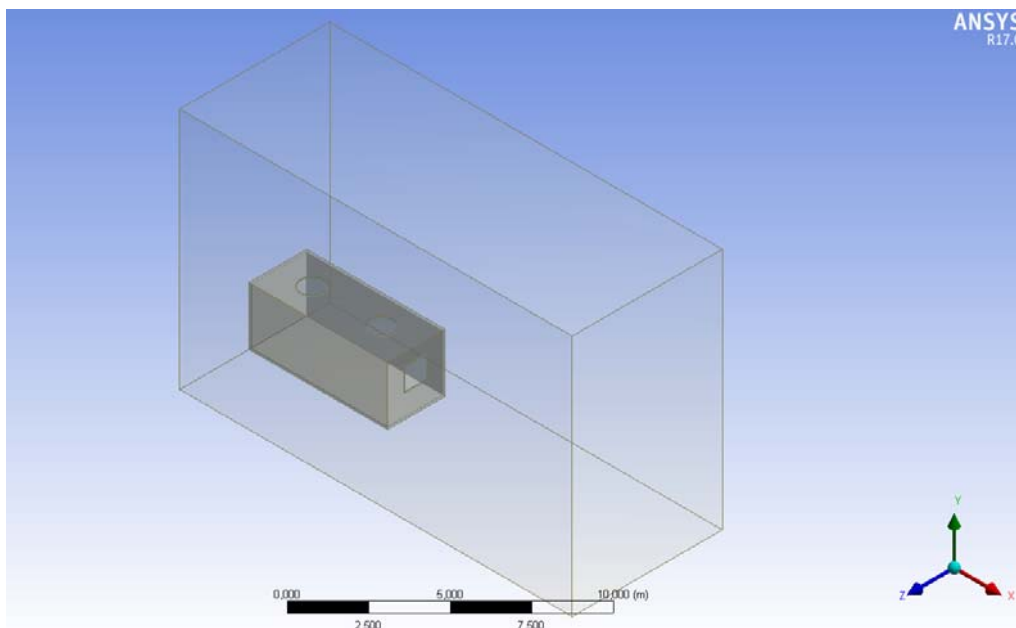


Figura 50. Diseño de los huecos de ventilación en el contenedor. (Fuente: propia)

El contenedor debe estar provisto de detectores de humo, de manera que se realizaría la apertura de los huecos de ventilación que permitirían la salida de los gases de combustión denegando la posibilidad del Backdraft.

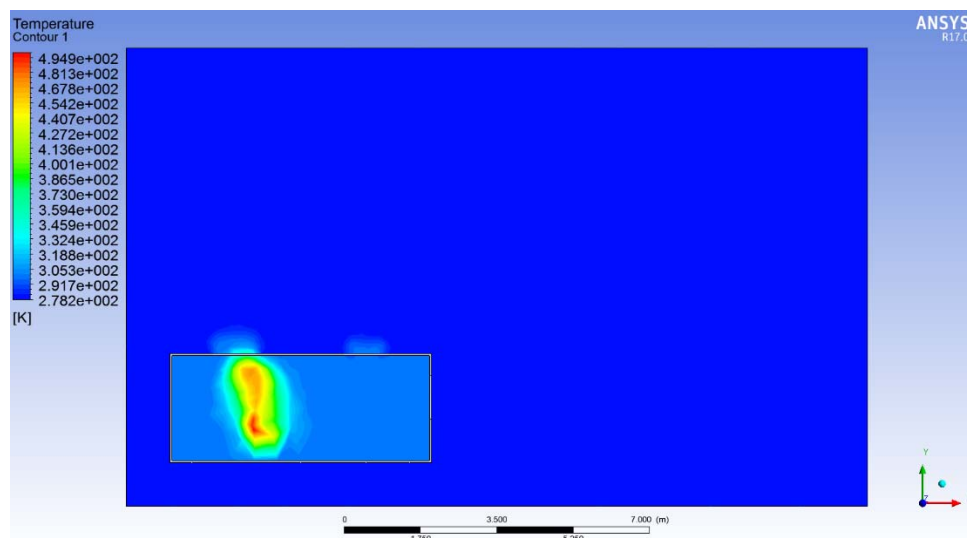


Figura 51. Fuga de metano formando una columna de fuego (1,918 s). (Fuente: propia)

El fuego evoluciona muy rápidamente, y se deben colocar los sistemas de huecos de ventilación de modo que se permita la evacuación inmediata de personas que pueden encontrarse en el interior o alrededores. Para permitir la evacuación, el humo no debe bajar de los 2 metros de altura (comprendiendo que el contenedor es de 2,5 metros). Para ello, se ha monitorizado un punto a dicha altura en la puerta lateral del compartimento.

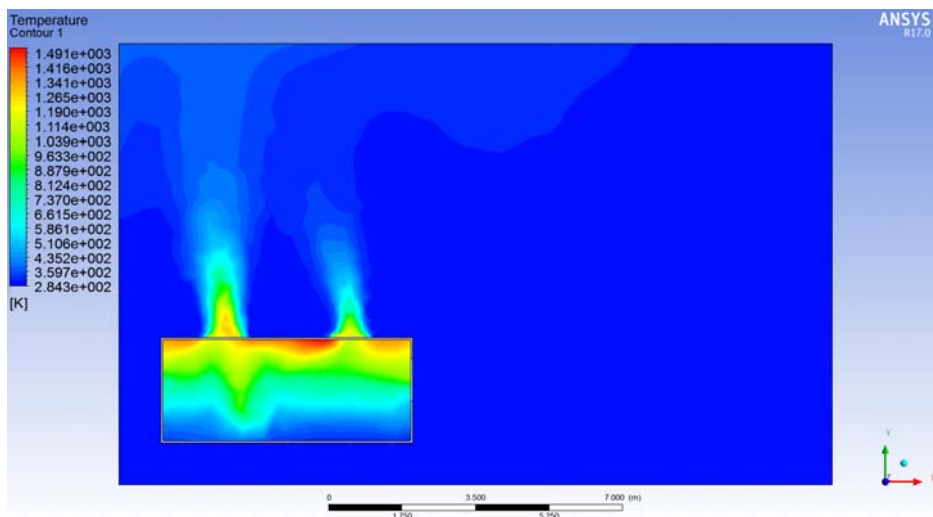


Figura 52. Sistema de apertura de huecos en recinto confinado (20,016 s). (Fuente: propia)

En la Figura 52, se observa el humo caliente sale por los orificios del techo, permitiendo que la columna de humo no se retenga en el compartimento.

La apertura ha sido dimensionada en dos huecos de 1 metro de diámetro. Habiendo monitorizado la concentración de dióxido de carbono a 2 metros situado en la apertura lateral del contenedor (la puerta de entrada y salida humana), se ha considerado que era suficiente para poder permitir evacuación en caso de emergencia.

De haber diseñado huecos más pequeños, la ventilación habría sido posiblemente suficiente para que no se produjese el Backdraft, pero posiblemente no de que se pudiesen evacuar a las víctimas. Una mayor apertura de huecos facilitaría la ventilación, pero ocuparía demasiada superficie de una estructura pequeña.

Los sistemas de ventilación, hacen posible a las dotaciones de bomberos poder intervenir sin riesgo de explosión.

#### 4.4. DISEÑO DE SEGURIDAD CURATIVA.

En el apartado anterior se muestra cómo evitar la situación de posible Backdraft gracias a un diseño de ventilación modelado por ordenador. Pero, las herramientas de simulación pueden ser útiles también para estudiar la dinámica de fluidos una vez que no se ha podido evitar la situación de Backdraft.

En el contenedor de la Figura 41, se realiza una apertura lateral cuando en el interior hay gases combustibles a muy alta temperatura. Esta apertura casi siempre va a conllevar a una deflagración. Haciendo uso de las herramientas de simulación, se puede estudiar si la apertura en el techo conllevaría a la misma situación, o si por contrario evitaría la deflagración, sin necesidad de realizarlo en la vida real ni de acarrear riesgos.

Así pues, se ha propuesto un modelo de intervención a una situación de posible Backdraft, para poder extinguir el incendio disminuyendo las probabilidades de deflagración. Para ello se ha diseñado el mismo modelo que en los apartados anteriores, pero realizando una apertura de 1 x 1,5 metros en la parte superior del contenedor.

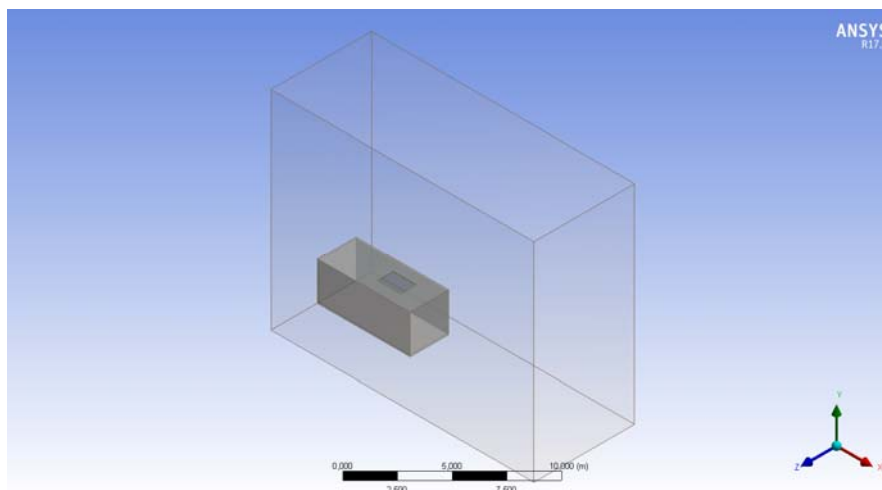


Figura 53. Diseño de maniobra de intervención en situación de Backdraft. (Fuente: propia)

Se ha pensado que, si la apertura se realiza en la parte superior del contenedor, la corriente de gravedad que se puede originar, distaría mucho de la situación habitual de Backdraft. Este estudio no se podría realizar sin el uso de herramientas CFD.

Las condiciones iniciales impuestas son las mismas que en el apartado (4.2.), en el cual se simula el Backdraft.

En ambas simulaciones se ha monitorizado la fuente de ignición que prepara la deflagración, de modo que cuando el monóxido de carbono entra en contacto con la corriente de gravedad disminuyendo la concentración de CO al límite superior de inflamabilidad ocurra el Backdraft.

Como se observa en la Figura 43, al realizar la apertura en el lateral, el aire frío entra creando una interfase de turbulencia donde se va a generar una pre-mezcla de gases inflamables.

Al realizar la apertura en el “techo” del contenedor, la corriente de gravedad no se genera de esa forma.

En el instante en el que se realiza la apertura por la zona superior del contenedor, sale una bola de humo debido a la sobrepresión en el interior del recinto confinado. Una vez se ha estabilizado, el gas combustible caliente sale al exterior por diferencia de densidades.

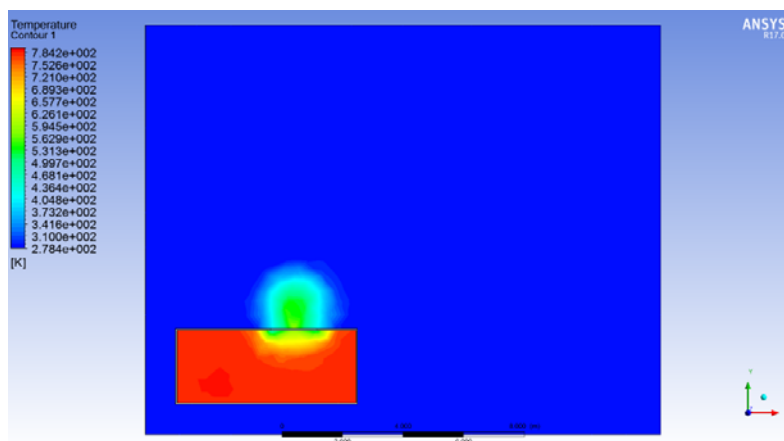


Figura 54. Simulación de maniobra de intervención (Temperatura, 0.182 s). (Fuente: propia)

Al igual que en la simulación del punto (4.2.), hay un importante gradiente de densidades, pero al contrario que en dicha simulación, la diferencia de densidades es incapaz de crear una turbulencia de tan altas magnitudes.

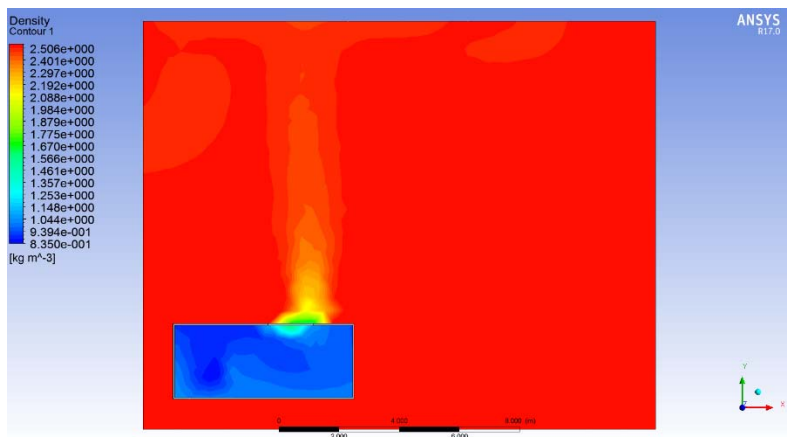


Figura 55. Simulación maniobra de intervención (densidad, 15.012 s). (Fuente: propia)

Si se observa en el mismo instante que en la Figura 46 la densidad del fluido en el interior del contenedor, se observan grandes diferencias.

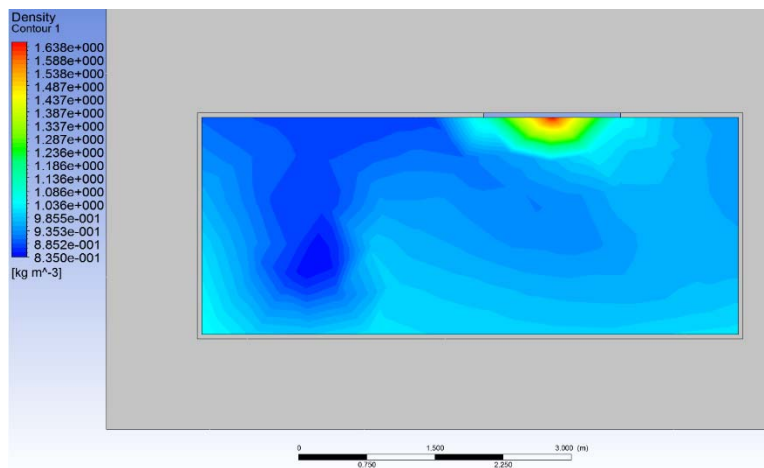


Figura 56. Simulación maniobra de intervención en el interior del contenedor (densidad, 15.012 s). (Fuente: propia)

Comparando la Figura 56 de apertura en la parte superior, con la Figura 46 de apertura en el lateral del contenedor, la máxima densidad es de 1,65471 kilogramos por metro cúbico con un gradiente de 0,81978 kilogramos por metro cúbico.

Este resultado es consecuencia de que el aire del exterior tiene mayor impedimento en entrar al contenedor a pesar de ser más denso que el fluido que hay en el interior. Es un punto en el que directamente se reducen las probabilidades de que se forme una pre-mezcla inflamable entre el aire del entorno y el contenido de los gases inflamables.

La diferencia de densidades es menor que con la apertura lateral, y eso conlleva a que la velocidad que acarrean los fluidos también sea menor.

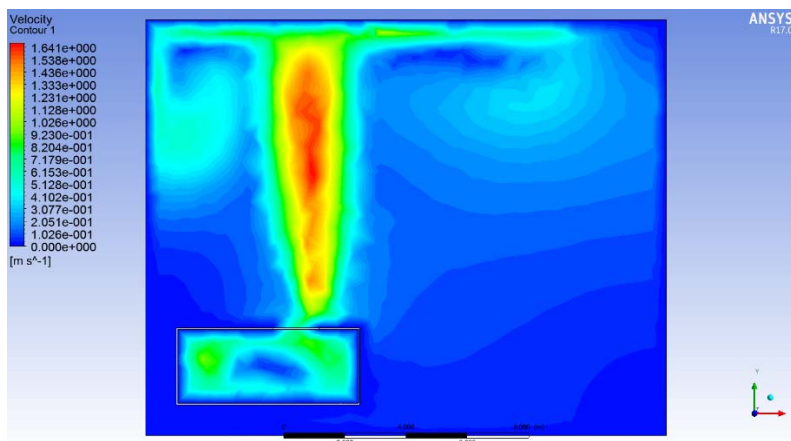


Figura 57. Simulación maniobra de intervención (velocidad, 15.012 s). (Fuente: propia)

En la Figura 57 se observa que las velocidades en el segundo 15 de la simulación alcanzan 1,677 metros por segundo en la columna de humo. Inferior que lo mostrado en la Figura 44 de 2,3 metros por segundo, pero lo importante es la velocidad en el interior del contenedor, que es donde se puede formar la pre-mezcla.

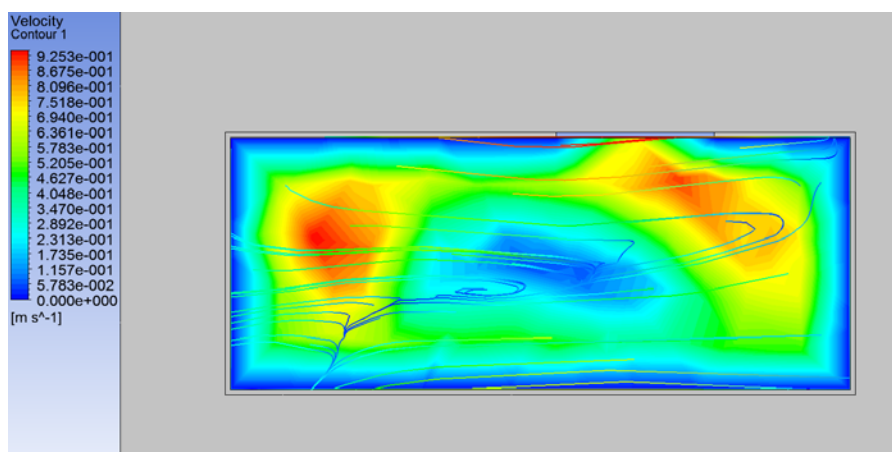


Figura 58. Simulación maniobra de intervención en el interior del contenedor (velocidad, 15.012 s). (Fuente: propia)

En la Figura 58 se muestra el contorno de velocidades, así como las líneas de flujo para poder apreciar la dirección de las velocidades. El contorno de velocidades permite apreciar que se alcanzan velocidades de hasta 0,945 metros por segundo. Las líneas de flujo permiten observar la dirección de las corrientes del fluido, comprendiendo que la dinámica del fluido en el interior del contenedor se mueve de forma rotativa, no laminar como en la Figura 45, donde la velocidad es de hasta 1,2 metros por segundo en la corriente de gravedad.

El análisis de las velocidades y densidades alcanzadas en el mismo instante para las dos simulaciones que tienen las mismas condiciones iniciales apunta a que realizar la maniobra de intervención por la parte superior del recinto disminuiría la probabilidad de deflagración.

La concentración de oxígeno es de esperar que sea inferior en la simulación diseñada para una intervención de bajo riesgo.

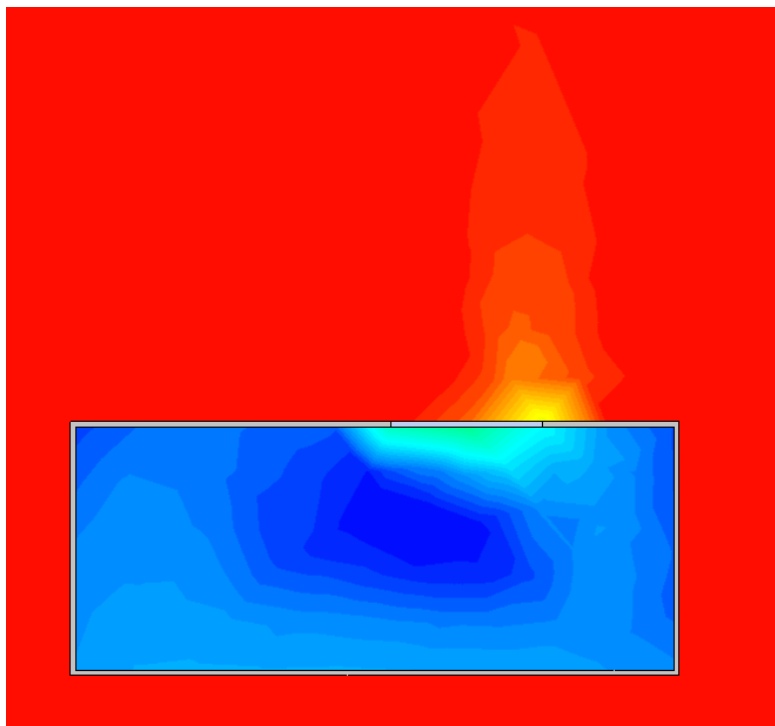


Figura 59. Simulación maniobra de intervención (Oxígeno, 15.012 s). (Fuente: propia)

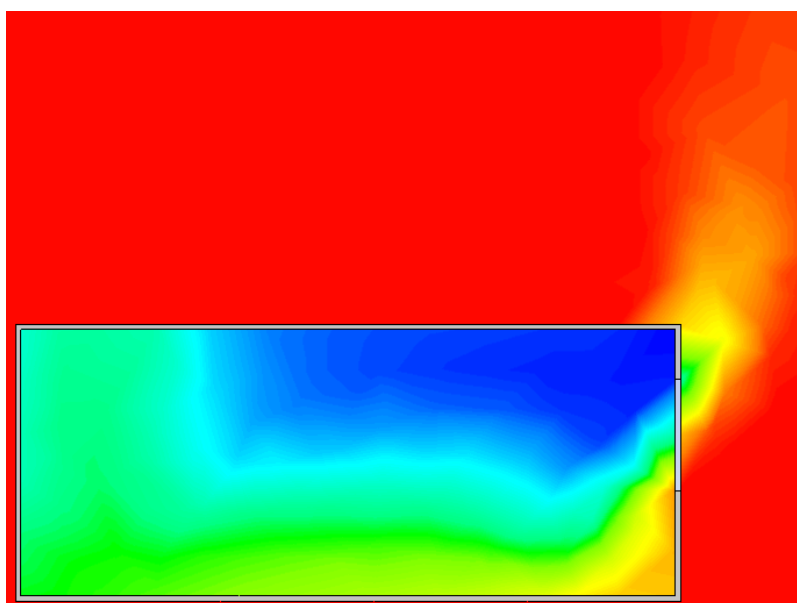


Figura 60. Simulación del Backdraft en el contenedor (Oxígeno, 15.012 s). (Fuente: propia)

En la Figura 59 y 60 se muestra la fracción másica de oxígeno en la simulación de maniobra de intervención y simulación del Backdraft respectivamente. Es la manera más visual de apreciar la dinámica de fluidos que adopta el oxígeno, simplemente cambiando la geometría del recinto donde se ha producido el incendio.

En la Figura 59, el oxígeno aumenta poco a poco su concentración, introduciéndose con un movimiento rotativo y más lento dentro del contenedor en el instante mostrado en dicha figura la concentración másica máxima de oxígeno en el interior es de 0,0577 (5,77%). Mientras que en la Figura 60, el oxígeno ha formado una interfase con los gases de combustión precediendo a un inminente Backdraft ya que la concentración en fracción másica alrededor del punto de ignición es de 0,107 (10,7%), casi el doble.

Para conocer si el rango de inflamabilidad permitía la deflagración, se han monitorizado las fuentes de ignición, colocadas en el mismo punto en ambas simulaciones. Tal y como se explica en el punto (4.2.) dicha simulación ha sido diseñada para que entre en rango al segundo 16. En la propuesta maniobra de intervención no llega a entrar en rango durante los 30 minutos simulados.

Las conclusiones que se obtienen de esta maniobra de intervención propuesta de incendio de recinto confinado dónde se prevea un posible Backdraft es que, siempre que sea factible acceder por la parte superior a dicho recinto sin peligro de derrumbamiento, las probabilidades de que ocurra el Backdraft se reducen, en ciertos aspectos, incluso a la mitad. Por lo que siempre será la opción más correcta y menos arriesgada.

Las dotaciones de bomberos deben estar preparadas para conocer los síntomas previos a un fenómeno de combustión tan complicado como el Backdraft para poder combatirlo sin ponerse en peligro.



## Capítulo 5. Conclusiones

Las condiciones para que un Backdraft ocurra son las siguientes [ 2]:

- Extinción completa de un incendio por déficit de oxígeno.
- Concentración de gases combustibles que han quedado en exceso por la falta de oxígeno y supera su límite superior de inflamabilidad.
- Apertura repentina de oxígeno fresco que se introduce por corrientes de gravedad, provocando la mezcla de gases combustibles creando una mezcla inflamable.
- Presencia de una fuente de ignición (si los gases no superan la temperatura de autoignición).

Se ha realizado un experimento donde se reproduce el fenómeno Backdraft en un acuario de laboratorio de bomberos en el parque de bomberos de chiva. Dicho experimento se ha filmado en vídeo y con una cámara térmica.

Se ha diseñado un modelo tridimensional con el programa CREO, donde se ha replicado el acuario de laboratorio de bomberos. El modelo se ha exportado a un programa de CFD, donde se ha realizado una simulación del experimento, obteniendo resultados muy similares en comportamiento de dinámica de fluidos.

Para la realización de la simulación por CFD se ha utilizado el modelo de turbulencia DES (*Detached Eddy Simulation*) para modelos de transición. Para la configuración del modelo de combustión se ha utilizado el modelo EDM (*Eddy Dissipation Model*) para la combustión de butano.

El modelo contrastado con el experimento realizado en el parque de bomberos ha servido de base para poder utilizar otras geometrías con esa configuración. De esa manera, se ha realizado la simulación numérica de un Backdraft de un incendio real, imitando el realizado por el consorcio provincial de bomberos para la formación de las dotaciones de bomberos.

La simulación numérica del Backdraft ha servido con fines analíticos para comprender el comportamiento del fenómeno Backdraft, observando las velocidades, temperaturas y sobrepresiones alcanzadas en la corriente de gravedad y en la bola de fuego consecuente de la deflagración.

El modelo CFD ha permitido proponer una maniobra de intervención que reduzca las probabilidades de que se genere el Backdraft estudiando el acceso de las dotaciones de intervención al recinto. De esa manera, en las mismas condiciones iniciales, se ha concluido que, si la apertura se realiza por la parte superior, en vez de por el lateral del recinto confinado, se reducen en gran medida las probabilidades de que el Backdraft ocurra.

Del mismo modo se han utilizado las herramientas de CFD para estudiar la evolución de un incendio provocado por una fuga de gas natural en un recinto confinado, para poder estudiar una geometría que permita la evacuación inmediata de posibles víctimas, así como evitar el confinamiento de la combustión anulando la posibilidad de una situación de Backdraft, obteniendo una modificación basada en huecos de ventilación de la geometría inicial.

## REFERENCIAS

- [ 1] Andrei Horvat (Numerical simulation of backdraft phenomena), *Fire Safety Journal*, 2007
- [ 2] Georges Guigay (A CFD and experimental investigation of under-ventilated compartment fires), *Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy*, 2008
- [ 3] Gojkovic, D., "Initial Backdraft Experiments", Report 3121, 2000, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden.
- [ 4] Fleischmann, C.M., McGrattan, K.B., "Numerical and Experimental Gravity Currents Related to Backdrafts", *Fire Safety Journal*, 1999, Vol. 33, pp. 21-34.
- [ 5] Ji-Woong Park, Chang Bo Oh, Byung Il Choi, Yong ÇShik Han (Computational visualization of the backdraft development process in a compartment), 2015
- [ 6] Lars-Göran Bengtsson (Enclosure fires), Swedish Rescue Services Agency, 2001
- [ 7] Norma Española UNE-EN ISO 13943:2008 (Seguridad contra incendios), 2012
- [ 8] Experimental research on gas fire backdraft phenomenon, jinxiang Wu, Yingting Zhang, Xiang Gou, Meijuan Yan, Enyu Wang, Lianshueng Liu.
- [ 9] The current knowledge and training regarding Backdraft, Flashover, and other rapid fire progression phenomena, Gregory E. Gorbett, CFPS, MIFireE, Professor Ronald Hopkins, MS, CFPS.
- [ 10] Modeling a real backdraft incident fire, Alberto Tinaburri, Massimo Mazzaro
- [ 11] Backdraft phenomena, Charles M. Fleischmann, University of California, 1994
- [ 12] Backdraft: fire science and firefighting, a literatura review, Karel Lambert
- [ 13] NAFEMS (Fire Modeling in CFD), May 2010
- [ 14] Measurements of Heat Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited compartment fires, (NIST), Mathew Bundy, Anthony Hamins, Erik L. Johnsson, Sung Chan Kim, Gwon Hyun Ko, David B. Lenhert.
- [ 15] Firefighting in Under-ventilated compartments, Brian Hume, 2004
- [ 16] J.S. Salinas, M.I. Cantero y E.A. Dari, revista iberoamericana del agua 1 (2014)
- [ 17] <https://panelnaranja.wordpress.com/2011/07/09/del-triangulo-del-fuego-a-la-teoria-del-tetraedro/>
- [ 18] <http://www.quimitube.com/videos/cinetica-quimica-teoria-estado-de-transicion>
- [ 19] <https://www.tplaboratorioquimico.com/quimica-general/compuestos-quimicos/reaccion-de-combustion.html>
- [ 20] [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTécnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_379.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTécnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_379.pdf)
- [ 21] [http://www2.mathesonqas.com/pdfs/products/Lower-\(LEL\)-&-Upper-\(UEL\)-Explosive-Limits-.pdf](http://www2.mathesonqas.com/pdfs/products/Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits-.pdf)
- [ 22] [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/qda1106/CAP3/3B/3B1/](http://www7.uc.cl/sw_educ/qda1106/CAP3/3B/3B1/)

## **DOCUMENTO 2**

## **PRESUPUESTO**



## PRESUPUESTO

### Capítulo 1. presupuestos y mediciones

#### 1.1. Justificación de precios personal

Tabla 1. Cuadro de precios personal. (Fuente: propia)

Nº	Descripción	Importe		
		Precio (€/h)	Cantidad (h)	Total (€)
1	<b>Ingeniero químico</b>	15,00	300	4.500
2	<b>Inspector jefe de bomberos</b>	80,00	3	240
3	<b>Oficial jefe de guardia de bomberos</b>	80,00	3	240
			Importe total:	4.980

Para la mano de obra, han sido consideradas las horas invertidas por los 2 bomberos que supervisaron el experimento. Del mismo modo que las horas dedicadas por el ingeniero químico para la resolución completa del trabajo de fin de grado. Teniendo en cuenta la búsqueda de información, tiempo dedicado a las simulaciones, tiempo dedicado al experimento, así como redacción del mismo y reuniones con el tutor.

## 1.2. Justificación de costes de materiales

Tabla 2. Cuadro de precios de materiales. (Fuente: propia)

Nº	Descripción	Importe		
		Precio (€/h)	Cantidad (h)	Total (€)
1	<b>Alquiler “Acuario de laboratorio de Bomberos”</b> Realización de experimento	20	3	60
2	<b>Alquiler cámara térmica Dräger UCF 8000</b> Realización de experimento	400	3	1.200
3	<b>Bombona de butano</b> Realización de experimento	48,50	1	48,50
4	<b>Uso de las instalaciones de bomberos</b> Realización de experimento	10	3	30
5	<b>Ordenador</b> Ordenador sobremesa i5 8GB de RAM, IVA incluido.	880	1	880
			<b>Importe total:</b>	<b>2.218,5</b>

### 1.3. Justificación de costes generales

Tabla 3. Cuadro de precios de licencias.

Nº	Descripción	Importe		
		Precio (€)	Cantidad	Total (€)
1	<b>Licencia de ANSYS 17.0</b> Licencia ANSYS Anual	16.079,93	0,75	12.059,95
2	<b>Licencia CREO</b> Licencia CREO anual	5.000	0,75	1.250
3	<b>Licencia Microsoft Word</b> Licencia WORD anual	153	0,75	149,76
			<b>Importe total:</b>	<b>13.459,71</b>

Se ha presupuestado el coste de las licencias para la realización del TFG teniendo en cuenta el uso de ordenador y los distintos programas necesarios para su elaboración.

#### 1.4. Presupuesto de ejecución material

Tabla 5. Presupuesto de ejecución material

<b>Designación</b>	<b>Total (€)</b>
Costes de personal	4.980
Costes de material	2.218,5
Costes generales	13.459,71
<b>Total coste:</b>	<b>20.658,21</b>

#### 1.5. Resumen de presupuesto

En el concepto de “Gastos Generales” utilizado para la resolución del “Presupuesto Total” se incluyen gastos tales como luz, agua, internet, transportes, dietas, etc.

	<b>IMPORTE</b>
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	20.658,21
15% DE GASTOS GENERALES (GG)	3.098,73
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	23.756,94
21% IVA	4.988,96
<b>TOTAL PRESUPUESTO DE TFG</b>	<b>28.745,91</b>

Asciende el Presupuesto de Ejecución Material a la expresada cantidad de **VEINTEMIL SISCIENTOS CINCUENTA Y OCHO CON VEINTIÚN EUROS.**

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrata a la expresada cantidad de **VEINTITRESMIL NOVENTA Y OCHO CON SETENTA Y TRES EUROS.**

Asciende el Presupuesto Total del Trabajo de Fin de Grado a la expresada cantidad de **VEINTIOCHOMIL SETECIENTOS CUARENTA Y CINCO CON NOVENTA Y UN EUROS.**



## **DOCUMENTO 3**

### **PLANOS**



