



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Análisis de la distribución térmica en un elemento estructural durante un incendio
mediante dinámica de fluidos computacional

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

Presenta:

Ing. José Alberto Sebastián Mena Santiago

Dirigido por:
Dr. Enrique Rico García

Dr. Enrique Rico García
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Suplente

M.C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El presente estudio buscó comparar la precisión de una simulación con dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) al incrementar la cantidad de puntos de calor modelados en un elemento estructural durante un incendio. Para contribuir al creciente cuerpo de conocimiento sobre la confiabilidad de los análisis CFD en la simulación de eventos reales. Por otra parte, se determinó la distribución térmica del calor emitido en un incendio utilizando una, dos, tres, cuatro y cinco fuentes de calor en una simulación de geometría en común. Los resultados obtenidos por las simulaciones se compararon contra los datos arrojados por un experimento tomado de la base de datos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés) para evaluar su precisión. Se encontró el modelo que mejor se ajusta a dichas observaciones experimentales, examinando las diferencias de los gráficos simulados y los desarrollados por el NIST en términos de temperatura máxima. Se encontró que, a mayor número de puntos de calor, la precisión se reduce de manera mínima. Sin embargo, al analizar los beneficios ofrecidos por cada punto de calor adicional y al evaluar su viabilidad con respecto a los recursos invertidos, la precisión ganada en términos porcentuales es baja, por lo que al utilizar de uno a dos fuentes de calor se considera un número óptimo en las simulaciones de incendios que emplean análisis CFD.

(Palabras clave: CFD, interacción fuego estructura, incendio, distribución térmica)

ABSTRACT

The present study seeks to compare the accuracy of computational fluid dynamics (CFD) simulation by increasing the number of heat points modeled on a structural element during a fire. It is expected to contribute to the growing body of knowledge on the reliability of CFD analysis in modeling real events.

On the other hand, the aim is to determine the thermal distribution of the heat emitted in a fire using one, two, three, four and five heat sources in the simulation. The results obtained by these models will be compared against the data produced by an experiment taken from the National Institute of Standards and Technology (NIST) database to evaluate their accuracy.

The goal is to find the model that best fits these experimental observations by examining the differences of our simulations with the NIST tables in terms of temperature and time. It is expected that the greater the heat points, the greater the precision offered by the model.

However, it is desired to compare the benefits offered by each additional heat point to evaluate its viability with respect to the resources invested and the precision gained in percentage terms to contribute to the body of knowledge on the optimal number of heat sources in fire simulations using CFD analysis.

(**Keywords:** CFD, structure fire interaction, fire, thermal distribution)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a SECITHI por el apoyo económico que me brindó durante mis estudios y sin el cual no habría sido posible esta investigación.

Agradezco a mi familia y pareja que constantemente estuvieron conmigo apoyándome, escuchándome y aconsejándome, para poder cumplir este objetivo de vida.

Agradezco a mis profesores que con sus amplios conocimientos me ayudaron a encontrar puntos relevantes en esta investigación.

Agradezco a mi asesor y comité por todas sus enseñanzas, no solo en el aspecto de la investigación si no también de la vida.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	12
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
2.	ANTECEDENTES	14
2.1	EL CONCRETO Y SUS ESTRUCTURAS.....	14
2.2	LOS INCENDIOS.....	15
2.3	EL IMPACTO DE LOS INCENDIOS EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO	15
2.4	ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA MASA.....	18
2.5	ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MOVIMIENTO	21
2.6	ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.....	25
2.7	GENERACIÓN DE MALLA EN ANÁLISIS CFD	30
2.8	INVESTIGACIONES SOBRE SIMULACIONES CFD Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	31
3.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	33
3.1	HIPÓTESIS.....	33
3.2	OBJETIVO GENERAL.....	33
3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
4.	METODOLOGÍA.....	34
4.1	ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES EXPERIMENTALES	34
4.1.1	<i>Reporte de actividades de incendios</i>	35
4.1.2	<i>Geometría del objeto de estudio.....</i>	35
4.1.3	<i>Obtención de datos experimentales.....</i>	36
4.2	PROPUESTA DE CINCO ESCENARIOS.....	38
4.2.1	<i>Simulación de calibración.....</i>	38
4.2.2	<i>Simulaciones con diferentes fuentes de calor.....</i>	40
4.2.2.1	Caso 1 (C1).....	41
4.2.2.2	Caso 2 (C2).....	41
4.2.2.3	Caso 3 (C3).....	42
4.2.2.4	Caso 4 (C4).....	42
4.2.2.5	Caso 5 (C5).....	43
4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO	43
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
5.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN.....	45

5.2	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE DIFERENTES FUENTES DE CALOR.....	47
5.2.1	<i>Caso 1 (C1)</i>	47
5.2.2	<i>Caso 2 (C2)</i>	48
5.2.3	<i>Caso 3 (C3)</i>	49
5.2.4	<i>Caso 4 (C4)</i>	49
5.2.5	<i>Caso 5 (C5)</i>	50
5.3	GRÁFICOS COMPARATIVOS	50
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS		54
7.	APÉNDICE	57
7.1	CONFIGURACIÓN DE ENMALLADO ANSYS <i>FLUENT</i>	57
7.2	CONFIGURACIÓN Y PROPIEDADES DE LA SIMULACIÓN CFD EN ANSYS <i>FLUENT</i>	57
7.3	DATOS DE TEMPERATURA SIMULACIÓN CON UNA FUENTE DE CALOR	58
7.4	DATOS DE TEMPERATURA SIMULACIÓN CON DOS FUENTES DE CALOR	60
7.5	DATOS DE TEMPERATURA SIMULACIÓN CON TRES FUENTES DE CALOR.....	63
7.6	DATOS DE TEMPERATURA SIMULACIÓN CON CUATRO FUENTES DE CALOR	67
7.7	DATOS DE TEMPERATURA SIMULACIÓN CON CINCO FUENTES DE CALOR.....	70
8.	ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos extraídos de la prueba experimental en el punto 7	37
Tabla 2. Formato de obtención y orden de datos entre simulación y experimentación.	44
Tabla 3 Datos comparativos entre experimentación y simulación	47
Tabla 4 Comparativo de temperatura máxima entre la simulación de calibración y las modificaciones.....	51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elemento de concreto reforzada elaboración propia.....	14
Figura 2. Proceso de un análisis de dinámica de fluidos computacional, adaptado de [15].	17
Figura 3. Movimiento de un fluido a través de un volumen de control.	18
Figura 4. Volumen de control cúbico.	19
Figura 5. Interacción del fluido a través del volumen de control.	21
Figura 6. Afectación de velocidades.....	22
Figura 7. Elementos geométricos usualmente usados para formar mallas.	30
Figura 8. Enmallado de escenario de estudio.	31
Figura 9. Metodología resumida.....	34
Figura 10 .Plano del recinto experimental del reporte y el adaptado.	35
Figura 11. Puntos de lectura de temperatura en el reporte experimental.	36
Figura 12. Gráfico del reporte experimental y extraído para comparación del punto 7.....	37
Figura 13. Puntos seleccionados para el proceso de calibración.	38
Figura 14 Grafico de información de los puntos de interés.....	39
Figura 15. Escenarios propuestos y simulados de cada caso.....	40
Figura 16. Vista en planta e isométrica del caso C1.....	41
Figura 17. Vista en planta e isométrica del caso C2.....	41
Figura 18. Vista en planta e isométrica del caso C3.....	42
Figura 19. Vista en planta e isométrica del caso C4.....	43

Figura 20. Vista en planta e isométrica del caso C5.....	43
Figura 21. Distribución de temperatura en la simulación de validación	45
Figura 22. Gráfico de temperatura en la línea que representa el punto 1, 2, 3 y 7	46
Figura 23. Puntos que consideró la validación de la simulación.....	46
Figura 24. Simulación del caso C1	48
Figura 25. Simulación del caso C2.....	48
Figura 26. Simulación del caso C3	49
Figura 27. Simulación del caso C4 (Calibración).....	49
Figura 28. Simulación del caso C5.....	50
Figura 29. Gráfico comparativo	51
Ilustración 30 Grafico de relación entre fuentes de calor - efectividad- tiempo	52

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras están sometidas a diferentes fenómenos físicos, los cuales ocasionan efectos de desgaste o perdidas de materia como corrosión, despostillamiento, entre otros, estas afectaciones ocasionan una desuniformidad que produce cambios en su robustez haciéndola débil.

Los cambios de temperatura son acontecimientos que por medio de una variación de energía afectan directamente la resistencia de los elementos estructurales, temperaturas altas y bajas pueden cambiar la composición molecular de los materiales reduciendo su fortaleza ante efectos mecánicos como tensión, rotación y compresión.

Temperaturas altas ocasionan la pérdida de elasticidad del acero, el cual permite a las estructuras soportar efectos de tensión mientras que las temperaturas bajas provocan un endurecimiento que de igual manera crea una deficiencia ante este estado. La distribución calórica es un proceso de propagación de calor, que persiste hasta obtener un equilibrio térmico.

Particularmente los incendios son la propagación del fuego de manera incontrolada, este fenómeno puede surgir en diferentes escenarios como bosques, ciudades e industrias, por su naturaleza tan inesperada es difícil prevenirse ante siniestros como este.

Estos al presentar altas temperaturas actúan sobre las columnas, tráves, conexiones y losas, siendo estas últimas las más afectadas debido a su gran extensión, ocasionando un desequilibrio estructural al modificar su resistencia en diferentes puntos, lo cual podría ocasionar una inestabilidad en el conjunto de elementos, provocando pérdidas materiales, económicas y humanas.

La dinámica de Fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una rama de la ingeniería que se enfoca en la elaboración de simulaciones para analizar y resolver problemas relacionados con flujo de fluidos como líquidos y gases.

El CFD se utiliza para resolver problemas relacionados con cambios de temperatura, al relacionar la transferencia de calor a través de un fluido que se distribuye en un entorno.

Considerando el uso de una simulación se puede proponer diferentes escenarios donde posiblemente puede surgir un incendio en una estructura, tales como tomas de corriente o materiales combustibles.

El presente estudio mostró que el número de fuentes de calor que describe de manera efectiva el caso de estudio es de dos lo cual indica una predicción del 94.59%, es importante denotar que este porcentaje indica que simulaciones dicho número de elementos de alta temperatura es suficiente para describir el fenómeno.

Dentro del contenido de esta tesis se encuentran diferentes apartados como los antecedentes, que describen aquellos estudios que se enfocaron en encontrar el impacto de altas temperaturas sobre estructuras de concreto reforzado, las bases matemáticas de una simulación, las consideraciones al realizar análisis de interacción fuego estructura, la aplicación del CFD a pruebas experimentales relacionados con fuentes de calor y la interpretación de sus resultados.

En el capítulo de hipótesis y objetivos plantea un objetivo principal para comprobar la validez de una suposición, la cual dice que cinco fuentes de calor o más proporcionan una simulación que describe un fenómeno de incendio en un 85% y la descripción de actividades que permitan desarrollar el proyecto de manera efectiva.

La metodología presenta las condiciones experimentales que se utilizaron para el desarrollo de la investigación, como la descripción detallada de reportes de incendios controlados en laboratorios, efectos sobre la estructura, consideraciones para simularlo en un análisis CFD y gráficos comparativos que mostraron las variaciones que hay de una a cinco fuentes de calor.

Después se encuentran los resultados, los cuales mostraron la efectividad que hay al utilizar dos focos de calor, los factores que afectaron en la simulación y la razón por la cual se mostraron porcentajes del 94.59 por ciento.

Posteriormente se encuentra las conclusiones que se obtuvieron a base de los objetivos, hipótesis y resultados, los cuales presentaron áreas de oportunidad y

consideraciones para futuros proyectos relacionados con la interacción de fluido estructura. Finalizando con las referencias de todas las bibliografías utilizadas en el desarrollo del proyecto.

1.1 Justificación

Los incendios se presentan con mayor frecuencia que los sismos o huracanes. Actualmente en México hay un problema con la frecuente aparición de incendios en lugares de concentración humana como es el caso de escuelas, oficinas, centros comerciales, fábricas, entre otros.

Dentro de los últimos 10 años en México, más de 6 mil personas fallecieron por exposición al fuego, añadiendo que el ochenta por ciento de las edificaciones que sufren algún siniestro de incendio pierden el cien por ciento de su patrimonio [1].

Tal y como muestra el estudio de Li et al. [2], los incendios en zonas urbanas también tienen impactos sobre el medio ambiente debido a la combustión de estructuras artificiales y materiales sintéticos, los cuales dispersan metales en el entorno ocasionando contaminación y afectando la salud de la población.

Por este motivo, es necesario desarrollar un estudio o análisis que contribuya a mejorar la confiabilidad que tienen los modelos computacionales de estos fenómenos para contribuir así al desarrollo de estructuras más seguras.

Al conocer la efectividad de ciertos números de fuentes de calor, las futuras simulaciones podrán solo considerar los necesarios para tener comportamientos acercados a la realidad con una variación del 5 por ciento, esto permite trabajos rápidos y con menor gasto computacional, para diseños seguros y eficiente, al igual que el desarrollo de este proyecto contribuirá a la metodologías y aplicaciones del CFD en estructuras de concreto y acero.

1.2 Descripción del problema

En la elaboración de una simulación que represente un incendio, una de las características más importantes a considerar es conocer el número ideal de fuentes de calor a utilizar. Aunque se puede utilizar desde uno hasta infinidad de fuentes de calor, no se conoce el porcentaje de error que genera el incremento o reducción en la cantidad de puntos de calor que se incorporan en el modelo del fenómeno.

Idealmente se espera que una simulación pueda describir completamente este fenómeno, considerando todas las variables y con la menor cantidad de recursos computacionales, para desarrollar encontrar que elementos serán susceptibles a un incendio y poderlos reforzar para asegurar y resguardar la vida humana.

Sin embargo, no hay tantos estudios aplicados en el ambiente de la construcción, por ello, es importante realizar estudios que analicen esta variable para encontrar la variación que produce en los resultados tomando información proveniente de incendios reales o de medidas tomadas en estudios experimentales.

Actualmente la forma en la que se abordan estos problemas y se pretende describir estos fenómenos es realizando diferentes simulaciones donde se coloca una fuente de calor en diferentes puntos, teniendo diferentes simulaciones o agregando más de estos elementos, lo que provoca un gran gasto de recurso computacional y tiempo.

Este tipo de actividades ocasionan que debido a la gran inversión de tiempo y recursos se opte por no considerar estos estudios y compensar a las estructuras con aislantes térmicos para cubrir esta variación.

2. ANTECEDENTES

2.1 El concreto y sus estructuras

De acuerdo con Nawy & Balagurur, el concreto se crea por la interacción mecánica y química de un gran número de materiales constituyentes. Debido a la cantidad de sustancias que contiene esta mezcla es posible alterar su resistencia y durabilidad al variar sus proporciones para darle así una mayor resistencia ante fuerzas de compresión [3].

En la construcción, las estructuras de concreto reforzado se crean a partir del concreto en estado fluido y un elemento de refuerzo como el acero, durante su fraguado, ambos componentes son sostenidos con ayuda de moldes mientras adquieren resistencia para que la estructura se autosoporte [4].

Esto se debe a que el concreto es altamente resistente a la compresión pero débil en tensión y por ello es necesario colocar un acero de refuerzo que le permita resistir los esfuerzos de tensión resultantes de las cargas aplicadas [3]. Nawy & Balagurur establecen que tal acero permite reducir las deformaciones causadas por las cargas pesadas a largo plazo y principalmente consta de varillas, alambres, o mallas de alambre soldadas, tal como se ilustra en la Figura 1.

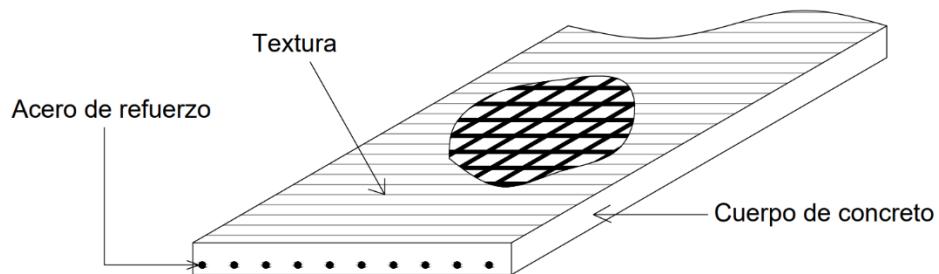


Figura 1. Elemento de concreto reforzada elaboración propia

Además, por su versatilidad, el concreto es muy usado en la construcción. No obstante, se encuentran en contacto constante con diversos factores de daño de diferente tipo: físicos,

químicos, no estructurales, estructurales y de acciones extraordinarias (p. ej., el fuego, los sismos, los impactos, el empuje y los asentamientos del terreno, los suelos expansivos u otros eventos capaces de producir daños) [5] que se deben tomar en cuenta en la edificación.

2.2 Los incendios

Otro elemento clave dentro de este estudio es el proceso por el cual, surge el fenómeno del fuego, Bayon lo define como una combustión viva que se manifiesta mediante llamas y emisión de humos o gases que desprenden calor. Dicho fenómeno puede surgir en cualquier parte y momento, siempre y cuando exista la presencia de materiales combustibles y la llegada de aire [6].

En palabras del mismo autor, éste puede surgir por múltiples causas de tipo natural o humana, debido a fallas en la corriente eléctrica, aparatos de calefacción con llama viva (p. ej., chimeneas), líquidos inflamables, o electricidad estática producida por la fricción.

Los incendios se pueden clasificar, de acuerdo con el portal de la UNAM, como tipo A si se alimentan de materiales combustibles sólidos, tipo B en el caso de combustibles líquidos y gases, tipo C para fuegos producidos por aparatos y equipos eléctricos energizados, tipo D para metales combustibles y tipo K para fuegos relacionados con aceites de origen vegetal y animal [7].

En el desarrollo de un incendio existen diferentes variables que pueden aportar al aumento de temperatura como puede ser la geometría de la estructura, los elementos que tiene su interior, la ventilación, los materiales de los cuales se compone el inmueble, entre otros, los cuales ocasionan deterioros en elementos principales como columnas y vigas siendo más afectados los últimos [8].

2.3 El impacto de los incendios en las estructuras de concreto reforzado

Teniendo presente la información en los apartados anteriores, esta sección busca analizar la interacción que tiene el fuego con las estructuras de concreto reforzado debido a que un

incendio es un evento que puede surgir en cualquier situación y ocasionar un deterioro en ellas[9].

El fuego de un incendio afecta las propiedades del concreto ocasionando perdidas de resistencia entre el 37.73% y 86.67%, pérdida de recubrimiento en columnas, vigas y losas, envejecimiento del material ocasionando una aceleración en su deterioro afectando en toda la estructura [10], [11].

Considerando que existen diferentes pruebas para evaluar el deterioro de un concreto después de un incendio, la extracción de una muestra característica determina la pérdida de resistencia ante efectos de compresión, disminuyendo su resistencia [12], [13].

Para el desarrollo de esta investigación, se realizó un análisis con dinámica de fluidos computacional. Por ello esta sección describe el principio por el que se rige este método numérico.

La dinámica de fluidos computacional elabora simulaciones para poder entender fenómenos relacionados con elementos en estado líquido o gas y su comportamiento en un entorno específico, mejor conocido como un volumen de control [14].

En la Figura 2 se ilustra la serie de pasos que se sigue en el desarrollo de un modelo computacional de fluidos, en otras palabras muestra el proceso que sigue un modelo de CFD, por medio de aproximaciones matemáticas busca describir un comportamiento real [15].

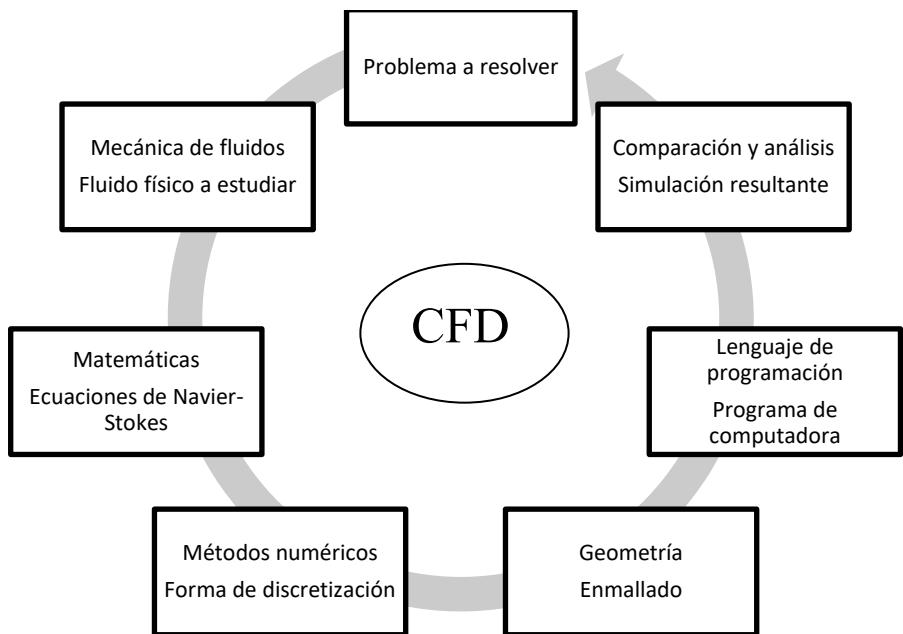


Figura 2. Proceso de un análisis de dinámica de fluidos computacional, adaptado de [15].

El primer paso identifica el fluido con el cual se va a trabajar puesto que cada fluido tiene diferentes propiedades. Por ejemplo, un material en estado líquido se comporta distinto a un material en estado gaseoso [16].

Una vez que se conoce el tipo de fluido que se modelará, se selecciona la ecuación que describa el fenómeno a estudiar, por ello se utilizarán las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son aproximaciones del comportamiento real de un fluido y se utilizan para estudiar cualquier aspecto que tenga que ver con estos [14].

En los siguientes apartados se describe el desarrollo de las ecuaciones que se utilizan para modelar y simular fenómenos relacionados con la interacción flujo estructura, partiendo de un elemento común como es el caso de un cubo el cual representara la celda primaria de un enmallado y como es que estas ecuaciones describen el comportamiento de un fluido y el mismo [17].

2.4 Ecuación de conservación de la masa

Una de las ecuaciones que se utiliza en los análisis CFD es la ecuación de la conservación de la masa. Esta ecuación describe el comportamiento de un fluido a través de un volumen de control. Se desarrolla considerando la cantidad de materia que entra (E), genera (G), sale (S) y se acumula (A) dentro del volumen de control.

$$E + G - S = A \quad (1)$$

De acuerdo con la expresión, la cantidad de materia que entra más la materia que se genera menos la materia que sale es igual a la acumulación dentro del volumen de control y, por principio de conservación de la masa, el cual estipula que la materia no se crea ni se destruye, sino que solo se transforma, en la ecuación uno la generación (G) será igual a cero.

La Figura 3 muestra el comportamiento que tendrá el fluido a través de un volumen de control cubico, este diagrama ilustra el principio de conservación de la masa puesto que considera entrada (E), salida (S) y acumulación (A).

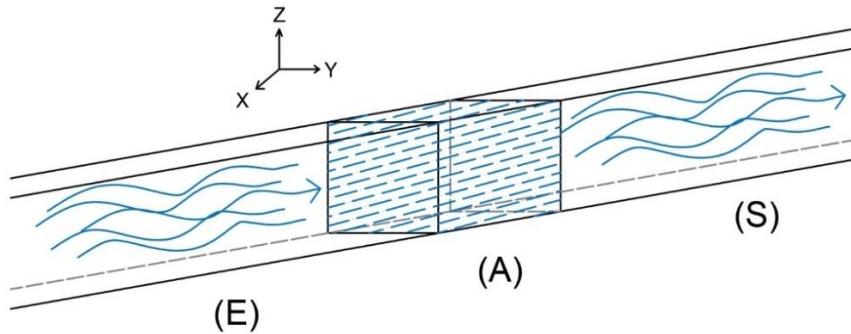


Figura 3. Movimiento de un fluido a través de un volumen de control.

Para obtener la masa se considera (2) que indica lo siguiente, la masa (m) es igual al producto de la densidad (ρ), la velocidad (v), el área (a) y el tiempo (t).

$$m = \rho v a t \quad (2)$$

Para el desarrollo de esta ecuación se utilizará el volumen de control cubico ilustrado en la Figura 4, y se procederá a obtener la cantidad de materia que entra con respecto a cada cara del volumen de control.

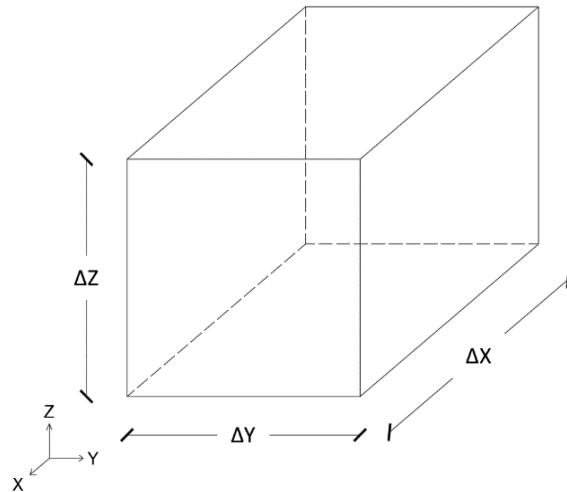


Figura 4. Volumen de control cúbico.

Para entrada (E) de masa con respecto a los ejes X, Y, Z del cubo.

$$\rho v_x |_x \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (3)$$

Para salida (S) de masa con respecto a los ejes X, Y, Z del cubo.

$$\rho v_x |_{x+\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (4)$$

Para la acumulación (A) de masa, se calculará la capacidad de masa que puede retener el cubo por medio de (5).

$$m = \rho V \quad (5)$$

Donde la masa (m) es igual al producto de la densidad (ρ) por el volumen (V) al restar la masa inicial dentro del cubo de la masa final después de que ha entrado el fluido, se obtiene (6).

$$\rho |_{t+\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \rho |_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \quad (6)$$

Una vez establecido todo el sistema de ecuaciones que se va a utilizar se sustituyen las ecuaciones anteriores en (1) dando como resultado (7).

$$\begin{aligned} & \rho v_x |_x \Delta Y \Delta Z \Delta t - \rho v_x |_{x+\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t + \rho v_y |_y \Delta X \Delta Z \Delta t - \rho v_y |_{y+\Delta y} \Delta X \Delta Z \Delta t + \\ & \rho v_z |_z \Delta X \Delta Y \Delta t - \rho v_z |_{z+\Delta z} \Delta X \Delta Y \Delta t = \rho |_{t+\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \rho |_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \end{aligned} \quad (7)$$

Se observa elementos en común (ΔX , ΔY , ΔZ y Δt) por lo que se simplifica (7) dividiendo dichos términos.

$$\frac{\rho v_x |_x - \rho v_x |_{x+\Delta x}}{\Delta X} + \frac{\rho v_y |_y - \rho v_y |_{y+\Delta y}}{\Delta Y} + \frac{\rho v_z |_z - \rho v_z |_{z+\Delta z}}{\Delta Z} = \frac{\rho |_{t+\Delta t} - \rho |_t}{\Delta t} \quad (8)$$

Una vez obtenida (8) se puede observar su gran similitud con la definición de la primera derivada denotada por (9).

$$\frac{df}{dx} \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (9)$$

Se extrae un signo negativo con el objetivo de poder sustituirla dentro de (8).

$$-\frac{\rho v_x |_x + \rho v_x |_{x+\Delta x}}{\Delta X} - \frac{\rho v_y |_y + \rho v_y |_{y+\Delta y}}{\Delta Y} - \frac{\rho v_z |_z + \rho v_z |_{z+\Delta z}}{\Delta Z} = \frac{\rho |_{t+\Delta t} - \rho |_t}{\Delta t} \quad (10)$$

Sustituyendo la expresión de la primera derivada en (10) y considerando $\Delta X \rightarrow 0$, $\Delta Y \rightarrow 0$, $\Delta Z \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$, se obtiene.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x - \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y - \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z = \frac{\partial}{\partial t} \rho \quad (11)$$

Al despejar a (11).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z = 0 \quad (12)$$

Para simplificar cada componente de (12) que contiene una derivada parcial se aplica el operador ∇ el cual es el resultado del producto punto de un vector de derivadas parciales con respecto al vector velocidad de cada dirección, dada por (13).

$$\nabla = \left\langle \frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\rangle \cdot \langle \rho v_x, \rho v_y, \rho v_z \rangle = \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \quad (13)$$

Sustituyendo (17) en (16) se puede observar la ecuación de conservación de la masa (14).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (14)$$

2.5 Ecuación de conservación de movimiento

Para el desarrollo de la ecuación de conservación de movimiento se considerará el volumen de control mostrado en la Figura 5 a partir de los mismos principios de entrada, generación, salida y acumulación.

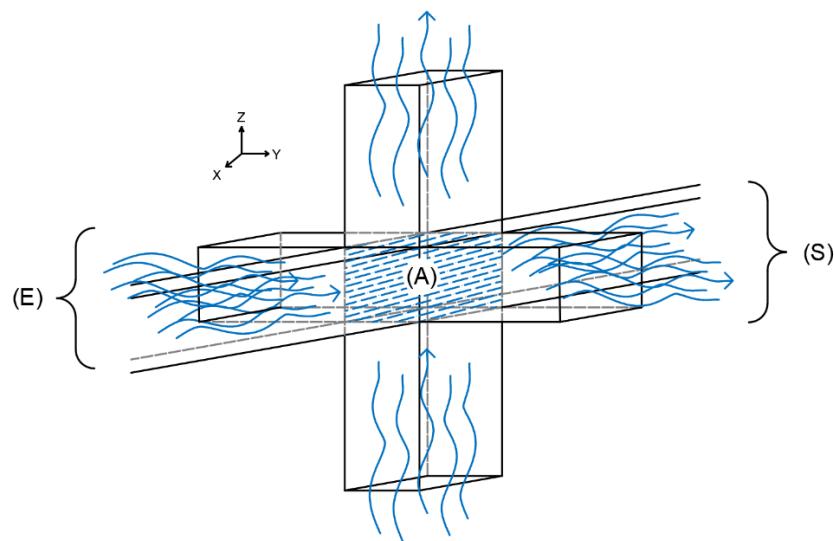


Figura 5. Interacción del fluido a través del volumen de control.

Como se puede observar, este diagrama muestra un fluido que atraviesa por todas las caras del volumen de control. A diferencia de la ecuación anterior, aquí se tendrá una generación de cantidad de movimiento. Al considerar la entrada de un fujo por un eje, éste afectará a los otros ejes creando una redirección de la velocidad tal y como se ilustra en la Figura 6.

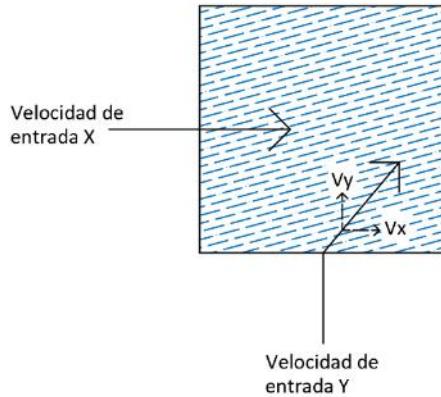


Figura 6. Afectación de velocidades.

A partir de estas consideraciones, se utilizó (15) donde la cantidad de movimiento (\bar{P}) es igual al producto de la densidad (ρ), la velocidad con la que entra en el fluido (v), la velocidad correspondiente a un eje si es afectada ($v_{X,Y,Z}$) por la entrada de fluido desde otro eje, el área (a) y el tiempo (t).

$$\bar{P} = \rho v v_{X,Y,Z} a t \quad (15)$$

Para la generación de momentum, se consideran dos ecuaciones una que la relaciona la presión (P) de contacto del fluido con respecto al área de entada y salida ($\Delta Y \Delta Z, \Delta X \Delta Z, \Delta X \Delta Y$) en un intervalo de tiempo (Δt), y la segunda relaciona la gravedad (g) que afecta en el sistema sobre el eje de estudio, considerando la densidad del fluido (ρ) en el volumen ($\Delta X \Delta Y \Delta Z$) donde esta interactuando en un intervalo de tiempo (Δt).

La expresión (16) muestra generación de momentum por gravedad y (17) por gravedad.

$$P|_x \Delta Y \Delta Z \Delta t - P|_{x-\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (16)$$

$$\rho g_x \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (17)$$

Para la acumulación de momentum se considera la densidad del fluido que se encuentra dentro del cuerpo, la velocidad que tiene en el eje de estudio, en este caso es un cubo de valores ΔX , ΔY , ΔZ .

$$\rho v_x|_{t+\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \rho v_x|_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \quad (18)$$

Teniendo todo el sistema de ecuaciones que se utiliza se sustituyen las ecuaciones que van de (15-18) en (1) dando como resultado la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} & \rho v_x v_x|_{x \Delta Y \Delta Z \Delta t} - \rho v_x v_x|_{x+\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t + \rho v_x v_y|_{y \Delta X \Delta Z \Delta t} - \rho v_x v_y|_{y+\Delta y} \Delta X \Delta Z \Delta t \\ & + \rho v_x v_z|_{z \Delta X \Delta Y \Delta t} - \rho v_x v_z|_{z+\Delta z} \Delta X \Delta Y \Delta t + \tau_{xx}|_{x \Delta Y \Delta Z \Delta t} \\ & - \tau_{xx}|_{x+\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t + \tau_{yx}|_{y \Delta X \Delta Z \Delta t} - \tau_{yx}|_{y+\Delta y} \Delta X \Delta Z \Delta t + \tau_{zx}|_{z \Delta X \Delta Y \Delta t} \\ & - \tau_{zx}|_{z+\Delta z} \Delta X \Delta Y \Delta t + P|_{x \Delta Y \Delta Z \Delta t} - P|_{x-\Delta x} \Delta Y \Delta Z \Delta t + \rho g_x \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t \\ & = \rho v_x|_{t+\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \rho v_x|_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \end{aligned} \quad (19)$$

Al igual que en las expresiones anteriores hay elementos en común, los cuales son ΔX , ΔY , ΔZ y Δt , para simplificar se dividen dichos términos en (19).

$$\begin{aligned} & \frac{\rho v_x v_x|_{x-\rho v_x v_x|_{x+\Delta x}}}{\Delta X} + \frac{\rho v_x v_y|_{y-\rho v_x v_y|_{y+\Delta y}}}{\Delta Y} + \frac{\rho v_x v_z|_{z-\rho v_x v_z|_{z+\Delta z}}}{\Delta Z} + \frac{\tau_{xx}|_x - \tau_{xx}|_{x+\Delta x}}{\Delta X} + \\ & \frac{\tau_{yx}|_y - \tau_{yx}|_{y+\Delta y}}{\Delta Y} + \frac{\tau_{zx}|_z - \tau_{zx}|_{z+\Delta z}}{\Delta Z} + \frac{P|_x - P|_{x-\Delta x}}{\Delta X} + \rho g_x = \frac{\rho v_x|_{t+\Delta t} - \rho v_x|_t}{\Delta t} \end{aligned} \quad (20)$$

Al obtener (20) se considera la expresión de la primera derivada (9) se extrae un signo negativo, para sustituir en (20) obteniendo.

$$\begin{aligned} & -\frac{\rho v_x v_x|_{x+\rho v_x v_x|_{x+\Delta x}}}{\Delta X} - \frac{\rho v_x v_y|_{y+\rho v_x v_y|_{y+\Delta y}}}{\Delta Y} - \frac{\rho v_x v_z|_{z+\rho v_x v_z|_{z+\Delta z}}}{\Delta Z} - \frac{\tau_{xx}|_x + \tau_{xx}|_{x+\Delta x}}{\Delta X} - \\ & \frac{\tau_{yx}|_y + \tau_{yx}|_{y+\Delta y}}{\Delta Y} - \frac{\tau_{zx}|_z + \tau_{zx}|_{z+\Delta z}}{\Delta Z} - \frac{P|_x + P|_{x-\Delta x}}{\Delta X} + \rho g_x = \frac{\rho v_x|_{t+\Delta t} - \rho v_x|_t}{\Delta t} \end{aligned} \quad (21)$$

Al sustituir la expresión de la primera derivada en (21) y al considerar $\Delta X \rightarrow 0$, $\Delta Y \rightarrow 0$, $\Delta Z \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$, se obtiene.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x v_x - \frac{\partial}{\partial y} \rho v_x v_y - \frac{\partial}{\partial z} \rho v_x v_z - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x = \frac{\partial}{\partial t} \rho v_x \quad (22)$$

Se despeja a cero (22)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_x v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_x v_z + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g_x = 0 \quad (23)$$

El proceso se repite con respecto al eje Y y eje Z por lo que las ecuaciones cambian a esta forma.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial x} \rho v_y v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_y v_z + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g_y = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_z + \frac{\partial}{\partial x} \rho v_z v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_z v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z v_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z = 0 \quad (25)$$

Las ultimas ecuaciones (23-25) representan la ecuación de conservación de momentum, para simplificar cada componente de la ecuación que contiene una derivada parcial se aplica el operador ∇ el cual es el resultado del producto punto de un vector derivadas parciales con respecto al vector velocidad de cada dirección.

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \langle \rho v_x, \rho v_y, \rho v_z \rangle = \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \quad (26)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \langle \rho v_x v_x, \rho v_y v_x, \rho v_z v_x \rangle = \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_x v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_x v_z \quad (27)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \langle \tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx} \rangle = \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zx} \quad (28)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \langle P_x, P_y, P_z \rangle = \frac{\partial}{\partial x} P_x + \frac{\partial}{\partial y} P_y + \frac{\partial}{\partial z} P_z \quad (29)$$

Al sustituir (26-29) en las ecuaciones (23-25) dando como resultado la ecuación 16 que corresponde a la ecuación de conservación de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho vv) + \nabla \cdot \tau + \nabla P - \rho g = 0 \quad (30)$$

2.6 Ecuación de conservación de la energía

Otra de las ecuaciones que se emplean es la que escribe la conservación de la energía. Esta se desarrolla con los mismos principios que se aplicaron en los casos anteriores: un flujo que entra se acumula y sale, además de factores exteriores que pueden aportar más energía al sistema estudiado.

$$e = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) v + q + Pv + \tau \cdot v \quad (31)$$

La expresión mostrada (31) es la fórmula de flujo de energía cuyas unidades son J/m² s. Esta se compone del transporte de energía cinética $\left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) v$; transporte de energía interna $(\rho \hat{U})v$ donde \hat{U} denota la energía interna por unidad de volumen; transporte de energía en forma de calor por conducción (q); trabajo efectuado sobre el fluido por fuerzas de presión (Pv); y el esfuerzo efectuado por un tensor y un vector de velocidad ($\tau \cdot v$).

Para la generación de energía con respecto al trabajo efectuado en el volumen de control contra las fuerzas de gravedad, donde se considera la densidad del fluido (ρ), la velocidad (v), la gravedad (g), el volumen ($\Delta X \Delta Y \Delta Z$) donde se encuentra el fluido y el tiempo (Δt).

$$\rho(v \cdot g) \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (32)$$

La Generación de energía a causas de reacciones externas (\dot{G}) cuyas unidades están en (W/m³).

$$\dot{G} \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t \quad (33)$$

La Acumulación de energía, considera la energía cinética e interna del sistema restando el valor final menos el valor inicial.

$$\left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_{t-\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \quad (34)$$

Una vez teniendo todas las consideraciones se va a sustituir en (1) las ecuaciones (32-34).

$$\begin{aligned} & e_x|_x \Delta Y \Delta Z \Delta t - e_x|_{x+\Delta X} \Delta Y \Delta Z \Delta t + e_y|_y \Delta X \Delta Z \Delta t - e_y|_{y+\Delta Y} \Delta X \Delta Z \Delta t + e_z|_z \Delta X \Delta Y \Delta t - \\ & e_z|_{z+\Delta Z} \Delta X \Delta Y \Delta t + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t + \dot{G} \Delta X \Delta Y \Delta Z \Delta t = \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_{t-\Delta t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - \\ & \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_t \Delta X \Delta Y \Delta Z \end{aligned} \quad (35)$$

Al igual que en las expresiones anteriores hay términos en común, los cuales son ΔX , ΔY , ΔZ y Δt , los cuales se dividirán en (35).

$$\frac{e_x|_x - e_x|_{x+\Delta X}}{\Delta X} + \frac{e_y|_y - e_y|_{y+\Delta Y}}{\Delta Y} + \frac{e_z|_z - e_z|_{z+\Delta Z}}{\Delta Z} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) + \dot{G} = \frac{\left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_{t-\Delta t} - \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_t}{\Delta t} \quad (36)$$

Con la expresión de la primera derivada se extrae un signo para sustituirlo en (36).

$$-\frac{e_x|_x + e_x|_{x+\Delta X}}{\Delta X} - \frac{e_y|_y + e_y|_{y+\Delta Y}}{\Delta Y} - \frac{e_z|_z + e_z|_{z+\Delta Z}}{\Delta Z} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) + \dot{G} = \frac{\left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_{t-\Delta t} - \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U}\right)|_t}{\Delta t} \quad (37)$$

Al sustituir las consideraciones de $\Delta X \rightarrow 0$, $\Delta Y \rightarrow 0$, $\Delta Z \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$ en (37) se obtiene.

$$-\frac{\partial e_x}{\partial x} - \frac{\partial e_y}{\partial y} - \frac{\partial e_z}{\partial z} + \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) + \dot{G} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U} \right) \quad (38)$$

Se despeja la ecuación.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \hat{U} \right) + \frac{\partial e_x}{\partial x} + \frac{\partial e_y}{\partial y} + \frac{\partial e_z}{\partial z} - \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \dot{G} = 0 \quad (39)$$

De la ecuación anterior se obtiene la divergencia (∇).

$$\nabla = \left\langle \frac{\partial}{\partial x}, + \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\rangle \cdot \langle \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z \rangle = \frac{\partial \mathbf{e}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{e}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial z} \quad (40)$$

Aplicando (40) en (39).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) - \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \dot{G} = 0 \quad (41)$$

En (41) el término (e) el cual se sustituye en la ecuación mencionada.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) \mathbf{v} + \mathbf{q} + P \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} \right] - \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \dot{G} = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho \hat{U} \right) \mathbf{v} \right] + \nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot (P \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) - \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \dot{G} = 0 \quad (43)$$

La expresión obtenida (43) es conocida el principio de conservación de la energía, esta se puede simplificar utilizando las ecuaciones de conservación del momentum y masa para obtener la ecuación de la energía mecánica, la cual se obtiene al realizar el producto punto de la ecuación de conservación del momentum con un vector de velocidad.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \mathbf{v} \right] + \mathbf{v} \cdot \nabla P + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) - \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} = 0 \quad (44)$$

Se sustituye (43) en (44).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + \nabla \cdot [(\rho \hat{U}) \mathbf{v}] + \nabla \cdot \mathbf{q} + P \nabla \cdot \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} - \dot{G} = 0 \quad (45)$$

Considerando los elementos dentro de (45), se toman los primeros términos.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + \nabla \cdot [(\rho \hat{U}) \mathbf{v}] \quad (46)$$

Se aplica la divergencia en cada factor de (46).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + \frac{\partial}{\partial X} (\rho \hat{U} v_X) + \frac{\partial}{\partial Y} (\rho \hat{U} v_Y) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho \hat{U} v_Z) \quad (47)$$

Al desarrollar a (47) se deriva cada término con la regla de derivadas de productos la densidad y velocidad como un término ($\rho v_{X,Y,Z}$).

$$\rho \frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \hat{U} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho v_X \frac{\partial \hat{U}}{\partial X} + \hat{U} \frac{\partial}{\partial X} (\rho v_X) + \rho v_Y \frac{\partial \hat{U}}{\partial Y} + \hat{U} \frac{\partial}{\partial Y} (\rho v_Y) + \rho v_Z \frac{\partial \hat{U}}{\partial Z} + \hat{U} \frac{\partial}{\partial Z} (\rho v_Z) \quad (48)$$

Reacomodando términos.

$$\rho \frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial \hat{U}}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial \hat{U}}{\partial z} + \hat{U} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \hat{U} \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \hat{U} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \hat{U} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \quad (49)$$

$$\rho \frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial \hat{U}}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial \hat{U}}{\partial z} + \hat{U} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \hat{U} \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \hat{U} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \hat{U} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \quad (50)$$

La ecuación que multiplica la energía interna (\hat{U}), es la ecuación de conservación de la masa la cual indica que su valor es igual a cero, este permite simplificar la ecuación anterior.

$$\rho \frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial \hat{U}}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial \hat{U}}{\partial z} \quad (51)$$

Se sustituye (51) en (45).

$$\rho \frac{\partial \hat{U}}{\partial x} + \rho v \cdot \nabla \hat{U} + \nabla \cdot q + P \nabla \cdot v + \tau : \nabla v - \dot{G} = 0 \quad (52)$$

Al utilizar a fórmula de entalpía, la cual describe que la entalpia (\hat{H}) es igual a la energía interna (\hat{U}) mas el producto de la presión por volumen ($P\hat{V}$), también se tiene que considera la capacidad térmica la cual se obtiene $c_p = \partial \hat{H} / \partial \hat{T}$, la cual indica que es la derivada de la entalpia (\hat{H}) con respecto a la temperatura (\hat{T}), teniendo en consideración dichos elementos se sustituye (52).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (v \cdot \nabla T) + \nabla \cdot q + \tau : \nabla v + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_P + \left[\frac{\partial P}{\partial t} + v \cdot \nabla P \right] - \dot{G} = 0 \quad (53)$$

La ecuación de transporte de temperatura, en términos de la densidad para utilizar la ley de Fourier de la conducción donde (k) es una constante de conductividad térmica.

$$q = -k \nabla T \quad (54)$$

La ecuación (54) se sustituye en (53) con la conversión $-\nabla \cdot (k \nabla T)$ o bien $-(k \nabla^2 T)$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (v \cdot \nabla T) - k \nabla^2 T + \tau : \nabla v + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_P + \left[\frac{\partial P}{\partial t} + v \cdot \nabla P \right] - \dot{G} = 0 \quad (55)$$

La ley de Newton de la viscosidad la indica que el producto doble punto del tensor de esfuerzos ($\tau : \nabla v$) es igual a la viscosidad (μ) multiplicando un producto doble punto de la rapidez de deformación con respecto a la velocidad ($\dot{\gamma} : \nabla v$).

$$\tau : \nabla v = -\mu(\dot{\gamma} : \nabla v) \quad (56)$$

Esta ecuación de viscosidad a causa del movimiento vectorial siempre es de razón positiva, se puede obtener una función que depende de la velocidad y se conoce como disipación viscosa $\Phi_v \equiv \dot{\gamma} : \nabla v$.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (\mathbf{v} \cdot \nabla T) - k \nabla^2 T - \mu \Phi_v + \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_P + \left[\frac{\partial P}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla P \right] - \dot{G} = 0 \quad (57)$$

Una forma simplificada que es más usada se desarrolla al aplicar la formula del gas ideal ($PV = nRT$) la cual indica que el producto de la presión absoluta por el volumen es igual al número de moles por constante universal de los gases ideales por la temperatura.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (\mathbf{v} \cdot \nabla T) - k \nabla^2 T - \mu \Phi_v - \dot{G} = 0 \quad (58)$$

Teniendo en cuenta la formula anterior y al considerar la velocidad inicial o igual a cero resulta en la ecuación de conservación de la energía.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T - \dot{G} = 0 \quad (59)$$

2.7 Generación de malla en análisis CFD

Otro elemento fundamental que se utiliza en la dinámica de fluidos computacional es la generación de malla. Es importante mencionar que para tener una malla de calidad es necesario obtener una geometría que permita desarrollar una malla de calidad [18].

Este proceso consiste en la dividir la geometría del volumen de control en diferentes formas de tipo tridimensional o bidimensional. A continuación, se ilustran en la Figura 7 algunas de las formas que se emplean típicamente para la generación de mallas:

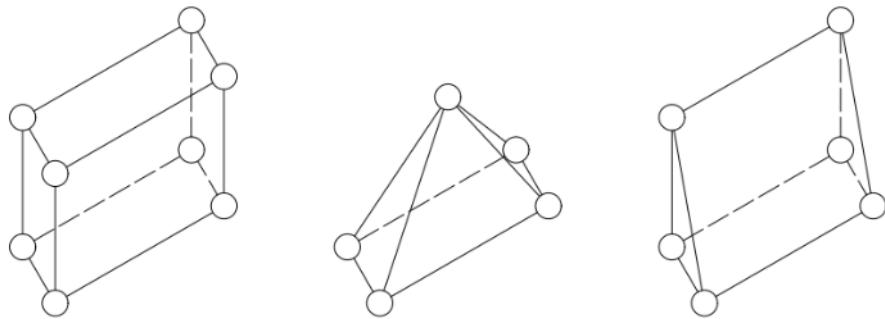


Figura 7. Elementos geométricos usualmente usados para formar mallas.

El objetivo del enmallado es mostrar la afectación en cada elemento del volumen para modelar efectos de deformación, localizar en qué puntos se concentra la mayor fuente de energía, medir su temperatura, entre otros propósitos [19].

Entre los elementos que utiliza un sistema computacional existen diferentes métodos para resolver distintos escenarios enfocándose principalmente en su densidad, velocidad y presión, sin embargo, otro elemento a considerar es el enmallado, el cual describe el movimiento entre el fluido y la geometría [20].

Por ejemplo, al enmascarar el escenario de estudio que se ilustra en la Figura 8, esta se divide en diferentes geometrías e incluso utilizar puntos más pequeños o grandes de acuerdo con el cuerpo que se está estudiando.

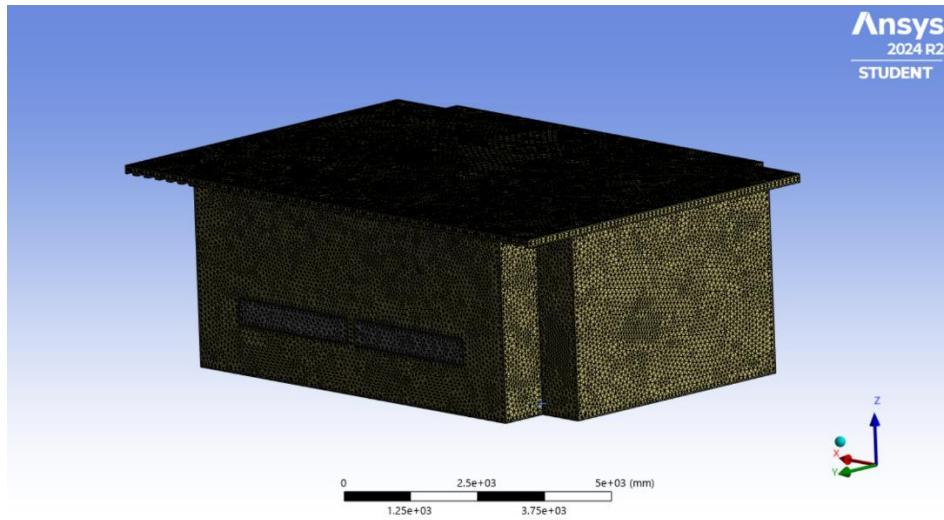


Figura 8. Enmallado de escenario de estudio.

Para el desarrollo de presente estudio se utilizó el elemento finito *standard* o mejor conocido como tetradimensional, el cual comúnmente se encuentra dentro de los análisis térmicos realizados en ANSYS Fluent, entre los tipos de elementos que se manejan este nos permite diseñar simulaciones más precisas para el análisis de fluidos a diferencia de los análisis mecánicos los cuales tienen otras consideraciones[21], [22].

2.8 Investigaciones sobre simulaciones CFD y validación experimental

Con una geometría correcta, un enmallado de calidad y un modelo que describa el comportamiento del fenómeno a estudiar, es necesario saber si los resultados son correctos, para ello el investigador debe de realizar diferentes experimentos y medir los valores del modelo real. En ocasiones puede ser medir la velocidad en un canal, tubería, velocidad en un túnel de viento, obtener la temperatura de un elemento expuesto a una fuente de calor entre otros [20].

En ocasiones un modelo de CFD puede ser comparado con un código de programación que describa un fenómeno y considerarlo como base experimental, como el estudio de Min Seop Song [14] muestra un análisis con mecánica de fluidos computacional, utilizando la geometría de un reactor y estudiando las pérdidas de presión sobre el caudal de

un flujo que es utilizado como un refrigerante en estado líquido, mostró que el caudal calculado por el código MARS-KS era muy similar al que se predijo en la simulación CFD.

Una aplicación en la cual diversos estudios han contribuido es la búsqueda de la efectividad de este sistema, tal y como aplica en su estudio RK Singh [23], utiliza un modelo de dinámica de fluidos computacional que desarrolla una validación de códigos calculados comparando con imágenes digitales de velocímetro, dando como resultado una similitud importante.

En otras ocasiones las pruebas experimentales juegan un papel importante para la validación de simulaciones puesto que la información que se utiliza debe ser confiable y con instrumentación adecuada para poder considerar posibles pérdidas de energía, velocidad, presión, temperatura entre otros tal y como menciona Saleta et al. [24].

Es importante mencionar que diversos estudios se han enfocado en encontrar comparativos entre los resultados obtenidos por un análisis CFD y un medio de comprobación, encontrando resultados muy similares a los obtenidos, es decir que no hay variación entre los datos obtenidos por experimentación o un sistema de ecuaciones, lo cual indica que los modelos que utiliza el CFD es en cierta manera preciso con pequeñas variaciones, que llevándolas a un campo aplicado pueden ser de gran utilidad [25], [26].

Al considerar estos puntos el estudio presente se basó en un reporte experimental que describa el proceso de incendio utilizando la geometría, los materiales, las propiedades estructurales del elemento sometido al experimento, encontró el modelo que describa dicho caso de estudio para posteriormente modificar el número de fuentes de calor.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

Utilizar varias fuentes de calor permite obtener una simulación que describa el comportamiento de un incendio con un nivel de confianza del 85 % con respecto a la distribución de temperatura en una losacero, en comparación con una simulación que emplea una única fuente de calor.

3.2 Objetivo general

Desarrollar un modelo CFD que represente las características de un estudio de caso, en un sistema de losacero con un punto en específico, para encontrar el número de simulaciones necesarias para describir un incendio.

3.3 Objetivos específicos

- Establecer las condiciones que repliquen un ensayo experimental sobre una losacero sometida a altas temperaturas con información publicada en la literatura.
- Proponer cinco escenarios diferentes variando el número de fuentes de calor.
- Realizar un análisis comparativo entre los datos de la simulación original y sus variantes considerando los gráficos de cada número de fuentes de calor para obtener un factor de confiabilidad.

4. METODOLOGÍA

Definir solo los elementos para metodología

Nota: la metodología describe claramente lo que se realizó paso por paso.

Durante el desarrollo de esta investigación, se realizó una serie de actividades, las cuales son de importancia para que el modelo pueda tener una validación, esta serie de actividades se resumen en la Figura 9:

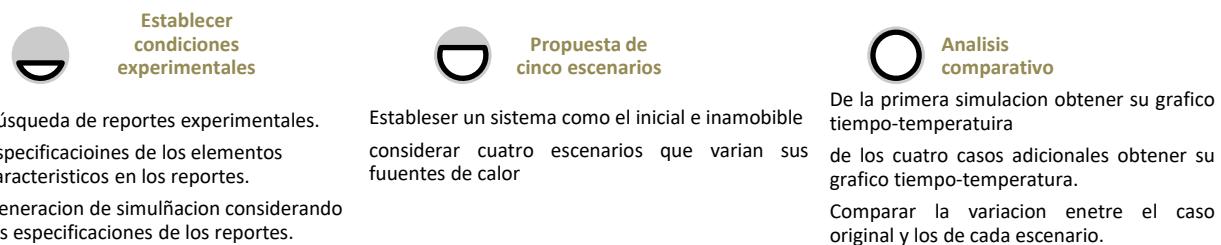


Figura 9. Metodología resumida.

4.1 Establecimiento de condiciones experimentales

Para el correcto desarrollo de una simulación de CFD es necesario tener un conjunto de datos reales que permita dar validez a dicho proyecto, este conjunto de información comúnmente es obtenido de pruebas experimentales.

Diversos estudios han utilizado pruebas experimentales como un método para verificar la exactitud de una simulación, sin embargo, se han realizado estudios donde se desarrollan códigos de cálculos que comparan imágenes digitales y ecuaciones de uso común como datos de validación [27].

Esto significa que siempre que exista una fuente de datos confiables es posible realizar este tipo de investigaciones cuando no es posible llegar a pruebas experimentales, bajo esta premisa el estudio presente se enfocó directamente en reportes experimentales como fuente de datos confiables.

4.1.1 Reporte de actividades de incendios

Debido a la complejidad de realizar simulaciones de incendio dentro de estructuras de concreto, se buscó información arrojada por estudios experimentales que describieran su comportamiento en las bases de datos del NIST.

Los reportes de interés fueron aquellos en los que describían elementos estructurales de concreto reforzado sometidos altas temperaturas, para reproducir el comportamiento real de un incendio dentro de edificaciones.

Estos reportes contienen información relacionada con los esfuerzos estructurales y de conducción térmica en los diferentes elementos estructurales que conforman el espécimen de experimentación. Para los fines perseguidos por la presente investigación, se tomaron sólo los datos y gráficos que describieran las variables de temperatura a lo largo del tiempo en los elementos más susceptibles durante el experimento.

4.1.2 Geometría del objeto de estudio

Al seleccionar el reporte *NIST Technical Note 2203*, se realizó una recreación del plano de la estructura sometida a altas temperaturas, esta modificación se enfocó en transformar las unidades al sistema métrico y mostrar las dimensiones necesarias para la simulación, la (Figura 10a.) muestra el plano del reporte original y la (Figura 10b.) su adaptación.

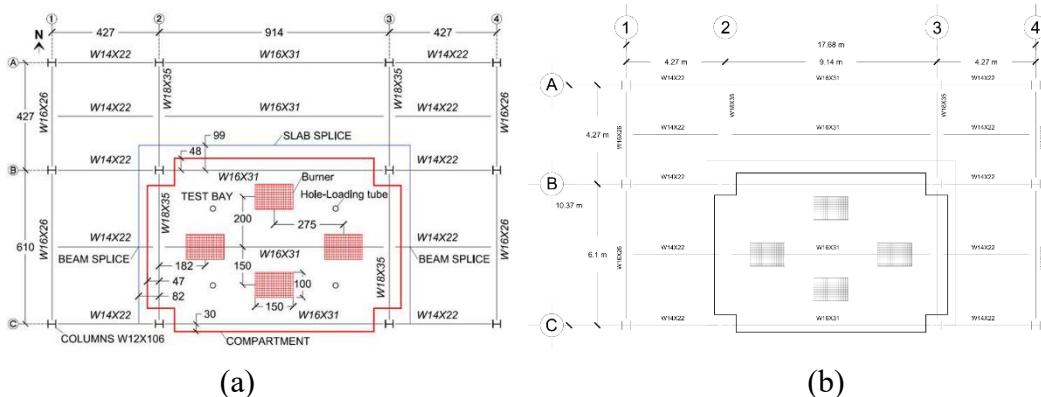


Figura 10 .Plano del recinto experimental del reporte y el adaptado.

De esta información se obtuvieron datos adicionales como distancias que el plano de reporte no expresa de manera directa, esta información se utilizó para realizar un modelo tridimensional, en cual se extrajo un volumen que se consideró como un fluido de aire perteneciente del recinto.

4.1.3 Obtención de datos experimentales

Durante un fenómeno de incendio una estructura es sometida a altas temperaturas en diferentes zonas, por ello es importante delimitar que punto será la referencia de comparación entre la simulación y el reporte experimental.

La Figura 11 muestra los diferentes puntos donde se tomaron datos de temperatura con respecto tiempo durante la prueba experimental, teniendo en cuenta que cada punto contiene un gráfico diferente y que cada el punto de interés en el presente estudio fue el más cercano a las fuentes de calor selecciono el número 7.

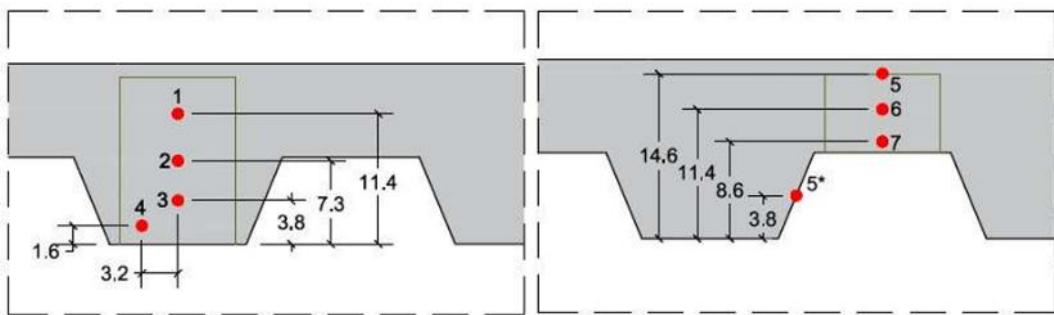


Figura 11. Puntos de lectura de temperatura en el reporte experimental.

Una vez identificado el punto de interés se extrajo la información del gráfico, con ayuda del programa Automeris.io para su correcta ejecución se utilizó una imagen vectorizada de los gráficos extraídos en el reporte, después el programa escalo los ejes y se les proporciono valores, finalmente se extrajo la información para posteriormente graficarlo en Excel y corroborar que la información obtenida sea equivalente a la del reporte experimental [28].

La tabla 1 muestra la información extraída del programa con la cual se realizaron los comparativos de la primera simulación la cual fue la simulación base del estudio presente, la

(Figura 12a.) muestra el grafico del reporte y la (Figura 12b.) muestra la que se obtuvo de la extracción de datos.

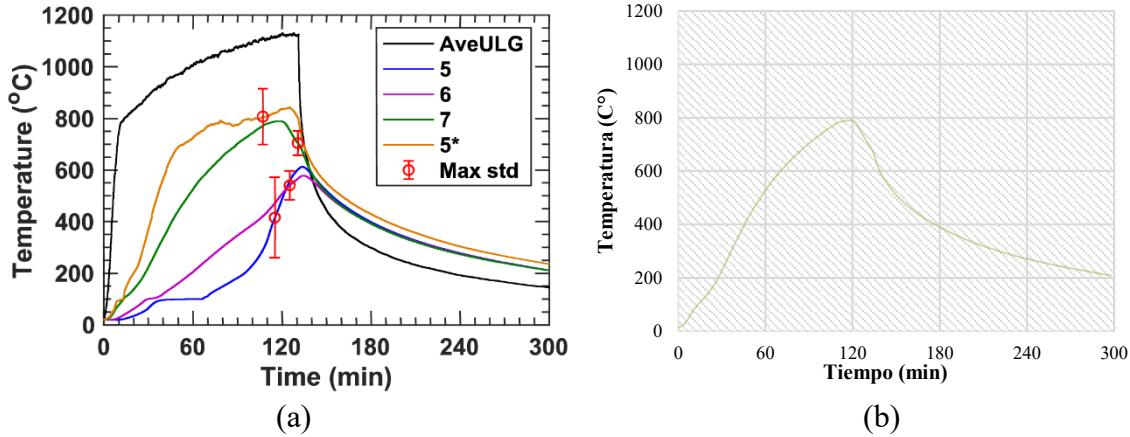


Figura 12. Gráfico del reporte experimental y extraído para comparación del punto 7.

Tabla 1 Datos extraídos de la prueba experimental en el punto 7

Tiempo (min)	Temperatura (C°)	Tiempo (min)	Temperatura (C°)	Tiempo (min)	Temperatura (C°)
0.00	12.60	78.35	646.33	182.55	383.15
0.34	12.78	84.44	677.51	188.64	366.13
4.10	26.57	90.54	705.95	194.74	351.14
7.06	49.57	96.64	731.80	200.84	337.00
9.74	72.57	102.73	756.94	206.93	324.88
12.67	94.67	109.26	779.37	213.03	313.19
18.21	126.60	114.93	788.65	219.13	302.65
23.20	160.67	121.01	786.95	225.22	292.40
27.08	194.79	123.96	765.45	231.32	283.29
30.40	230.90	126.01	744.27	237.42	274.19
33.45	265.43	130.41	705.56	243.51	266.53
36.50	301.01	134.17	671.71	249.61	258.58
39.83	337.12	136.78	624.55	255.71	251.49
42.88	369.48	140.42	581.36	261.80	244.55
45.92	404.06	144.39	548.95	267.90	238.18
49.53	438.93	147.88	524.37	274.00	231.67
53.41	473.03	152.06	498.85	280.09	225.73
57.29	505.56	158.16	468.03	286.19	219.94
61.44	539.58	164.26	442.38	292.48	213.47
66.43	574.72	170.35	420.77	297.83	208.49
72.25	610.55	176.45	401.02		

4.2 Propuesta de cinco escenarios

Dentro de este aparto se describe el proceso por el cual se realizó la prueba de simulación considerando como primer punto una simulación que se comportó como el reporte experimental validando los valores reportados por el laboratorio NIST y los que se obtuvieron de la simulación.

Posteriormente se desarrollaron cuatro simulaciones más respetando la geometría y la temperatura de la prueba de validación para considerar escenario donde el número de fuentes de calor varió de uno a cinco.

4.2.1 Simulación de calibración

Tal y como menciona Wei et al., para que una simulación CFD de resultados más acercados a la realidad, es necesario que los parámetros empleados sean los indicados, por ello es importante tener un reporte experimental que proporcione datos sobre la estructura a modelar, los elementos que la componen, su distribución, entre otros [29], [30].

Debido a que la losacero es un elemento de concreto reforzado y que la cantidad de acero expuesto en ella es considerable, se espera que este sea uno de los elementos más afectados por lo que se considera el principal objeto de estudio de esta investigación.

Como se mencionó en el apartado anterior se extrajo un gráfico de información reportada por el laboratorio NIST, sin embargo, al comparar la simulación de calibración con un solo punto es muy poco por ello este comparativo fue con 4 puntos específicos tal y como muestra la Figura 13.

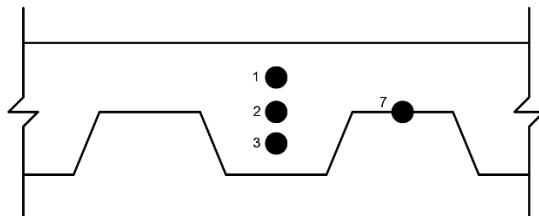


Figura 13. Puntos seleccionados para el proceso de calibración.

Al seleccionar los puntos anteriormente mencionados, se puede observar que se descartaron los puntos 4, 5, 5* y 6 mostrados en la Figura 11, esto se debe a que estos puntos no eran descriptivos para el análisis del presente estudio, puesto que estos debían ser los más característicos dentro de una estructura de concreto reforzado los cuales consideran los elementos internos y centrales.

El objetivo de esta simulación fue comparar la distribución de temperatura máxima en cada punto experimental y simulado considerando cuatro muestras representativas que posteriormente se compararon con los resultados obtenidos.

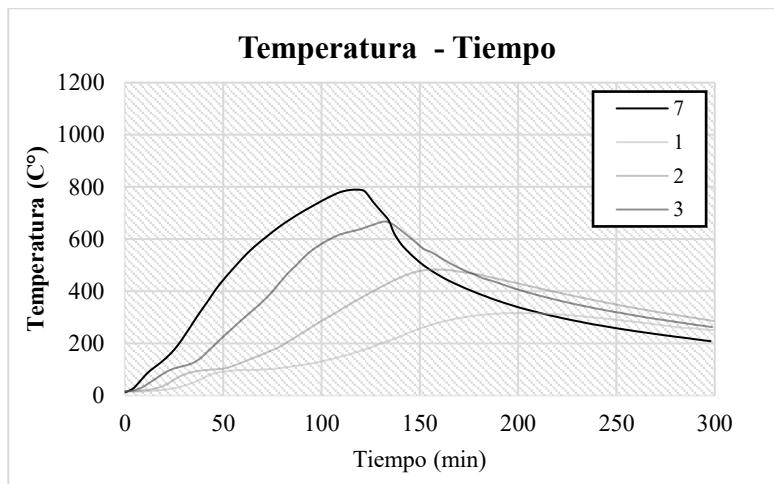


Figura 14 Grafico de información de los puntos de interés

La Figura 14 muestra los gráficos extraídos por el programa automeris.io, los cuales se utilizaron para conocer la temperatura máxima bajo la cual fue sometido el elemento estructural durante la fase de experimentación [28].

El software que se utilizó para el análisis de dinámica de fluidos computacionales fue ANSYS Fluent, este método de análisis ha sido utilizado en diversas investigaciones dando resultados satisfactorios y teniendo una interfaz amigable con el usuario, la cual permite tener desarrollar diferentes condiciones de entorno y modificación del fluido con una misma geometría [16].

Por la naturaleza de este fenómeno se consideró un modelo de flujo laminar mezclado con un fenómeno de convección térmica de cara a cara, al modificar estos elementos se pudo imitar las condiciones experimentales del caso de estudio, tal y como diferentes estudios han realizado pruebas de transferencia de calor [31].

4.2.2 Simulaciones con diferentes fuentes de calor

Con relación a los objetivos de la presente investigación se realizaron un total de cinco simulaciones incluyendo la de calibración, teniendo un total de cuatro propuestas las cuales no modificaron geometría, pero si el número de fuentes de calor.

La Figura 15 muestra la descripción grafica en la cual se acomodaron las fuentes de calor, en los anexos se encuentran los planos detallados de cada caso, los cuales contienen las dimensiones de cada uno de ellos. Es importante mencionar que estos gráficos solamente representan la interacción del fuego con la losacero, puesto que es el elemento de interés en el presente estudio.

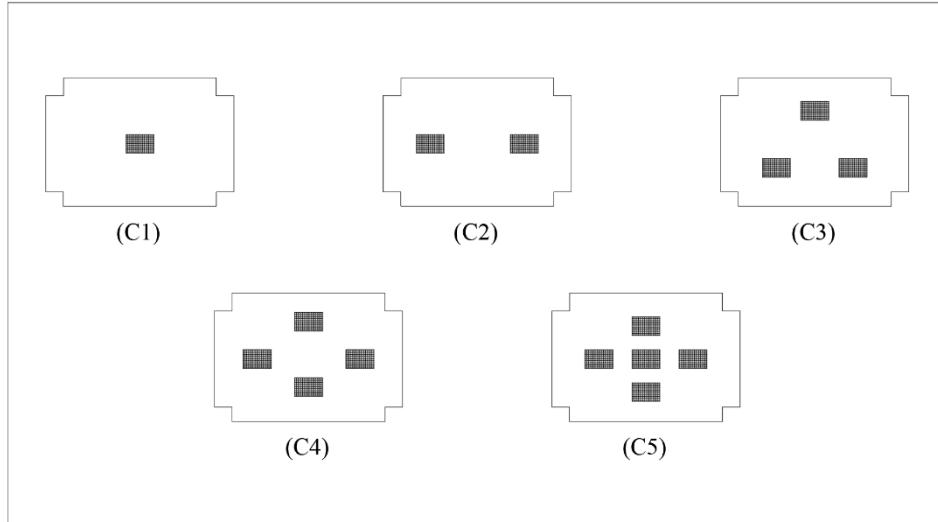


Figura 15. Escenarios propuestos y simulados de cada caso.

Como se mencionó anteriormente se realizó una distribución de fuentes de calor, simulando cada caso en específico, a continuación, se describe cada uno de ellos y sus respectivas características.

4.2.2.1 Caso 1 (C1)

La geometría se mantiene igual pero la fuente de calor se concentró en un solo punto central, respetando las dimensiones de la geometría base y del foco de temperatura, la Figura 16 muestra la distribución en planta y su modelo tridimensional.

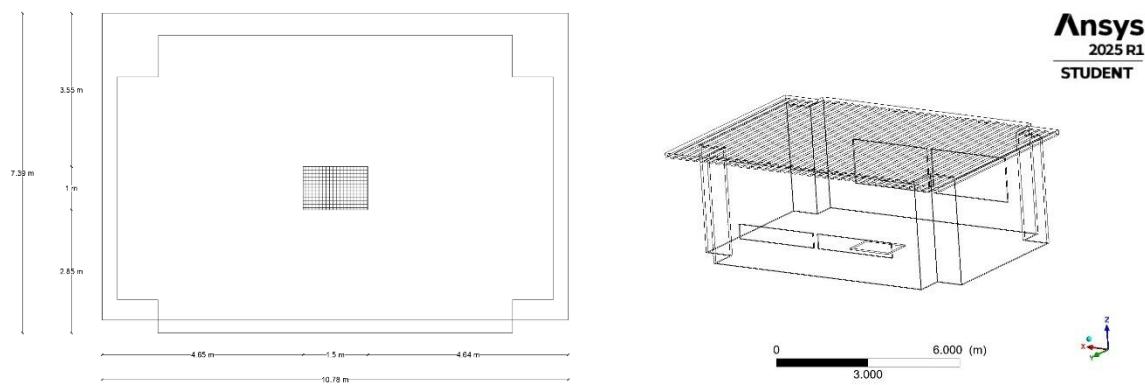


Figura 16. Vista en planta e isométrica del caso C1.

4.2.2.2 Caso 2 (C2)

En este escenario la geometría se mantiene igual y la fuente de calor distribuyó con en dos elementos, respetando las dimensiones de la geometría base y del foco de temperatura, la Figura 17 muestra la distribución en planta y su modelo tridimensional.

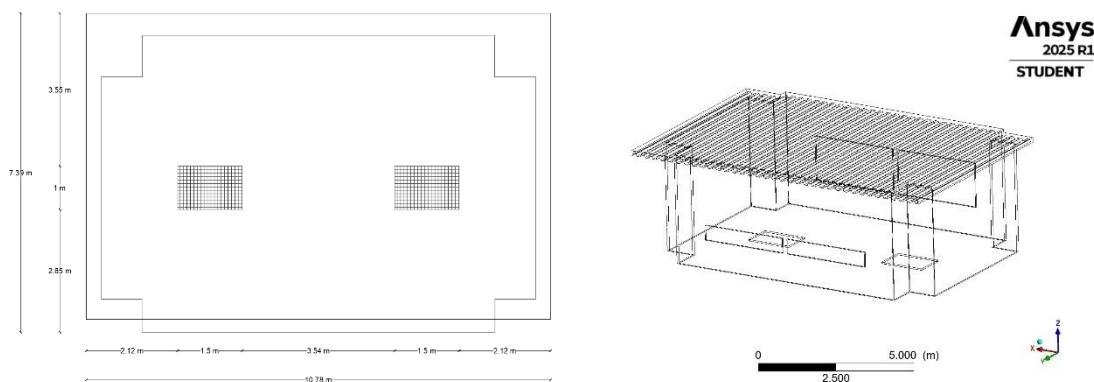


Figura 17. Vista en planta e isométrica del caso C2.

4.2.2.3 Caso 3 (C3)

En este escenario la geometría se mantiene igual y se consideraron tres fuentes de calor distribuidos en forma triangular, respetando las dimensiones de la geometría base y del foco de temperatura, la Figura 18 muestra la distribución en planta y su modelo tridimensional.

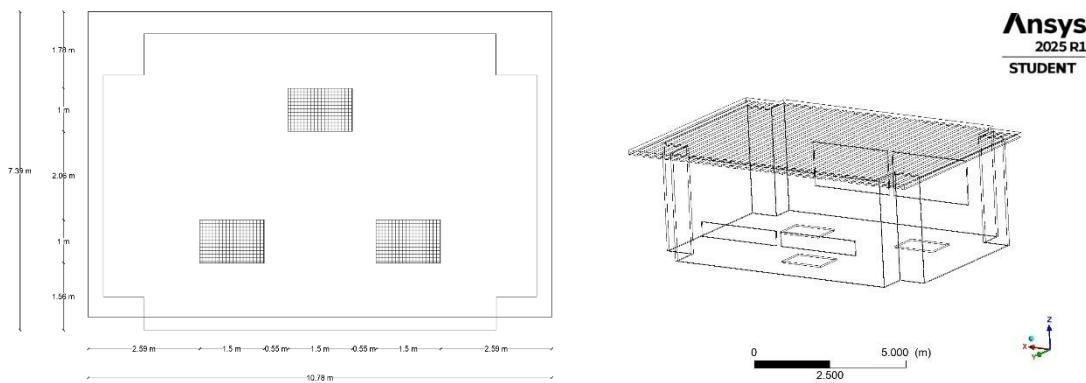


Figura 18. Vista en planta e isométrica del caso C3.

4.2.2.4 Caso 4 (C4)

Este escenario describe el comportamiento experimental y establece las condiciones del laboratorio donde se realizó la prueba, es conocido como la simulación de calibración mencionada anteriormente y considero las dimensiones reportadas en la publicación, la Figura 19 muestra la distribución en planta y su modelo tridimensional.

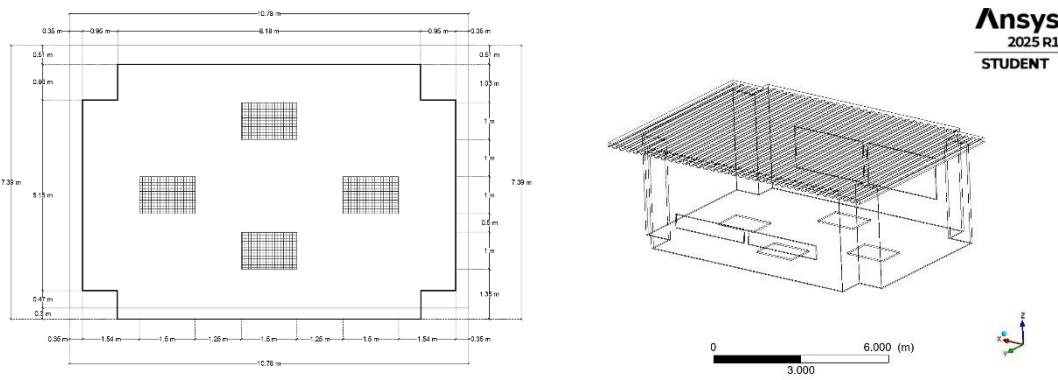


Figura 19. Vista en planta e isométrica del caso C4.

4.2.2.5 Caso 5 (C5)

En este escenario la geometría se mantiene igual y se redistribuyeron cuatro fuentes de calor para poder colocar una quinta de forma, respetando las dimensiones de la geometría base y del foco de temperatura, la Figura 20 muestra la distribución en planta y su modelo tridimensional.

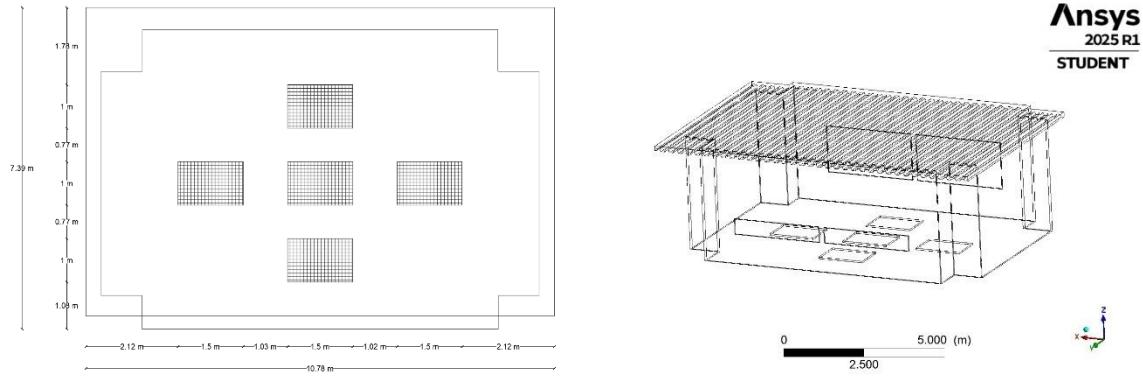


Figura 20. Vista en planta e isométrica del caso C5.

4.3 Análisis comparativo

Una vez obtenidos los cuatro escenarios adicionales se realizó una extracción de temperatura máxima para cada simulación, obteniendo un comparativo entre la simulación de calibración y las que varían las fuentes de calor.

La simulación base o de calibración debe de tener una confiabilidad mayor al 85 % para considerar que describe el comportamiento real de la prueba experimental, y debido a que solo se modificaron el número de fuentes de calor el comparativo se utilizó en los mismos puntos de la prueba de calibración.

La tabla 2 describe la información que se consideró para los gráficos comparativos y para el desarrollo de los gráficos, al tener este número de datos se realizó un gráfico de dispersión y obtuvo la confiabilidad en cada caso.

Tabla 2. Formato de obtención y orden de datos entre simulación y experimentación.

localización	Simulación de caso “n”	simulación de calibración o caso cuatro	Porcentaje de variación
	Temperatura máxima	Temperatura máxima	
1	°C	°C	%
2	°C	°C	%
3	°C	°C	%
7	°C	°C	%

Al obtener estos resultados se realizaron los gráficos de cada relacionados con el numero de fuentes de calor, considerando los puntos de la Figura 13, obteniendo un total de cuadro gráficos adicionales para cada simulación específica.

Posteriormente se realizó un grafico que contengan la descripción de cada caso y se promediaron los resultados para obtener una descripción general que considera todas las simulaciones, de esta forma se obtendrá un grafico que contemplan las variables en cada simulación específica.

Finalmente, con los datos de efectividad y tiempo de cálculo en cada simulación específica se desarrolló un gráfico que relancina la efectividad de cada caso de estudio y el tiempo dando como resultado una representación que permite conocer el beneficio computacional considerando dichas variables.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de la simulación de calibración

Con los datos de la Tabla 1 y los resultados de la primera simulación se realizó un comparativo de distribución térmica entre estos dos conjuntos de datos, de acuerdo con los resultados de la simulación se obtuvo una temperatura de 855.32 °C en el punto 7, tal y como muestra la Figura 21 donde la línea roja es la extracción de datos de la investigación.

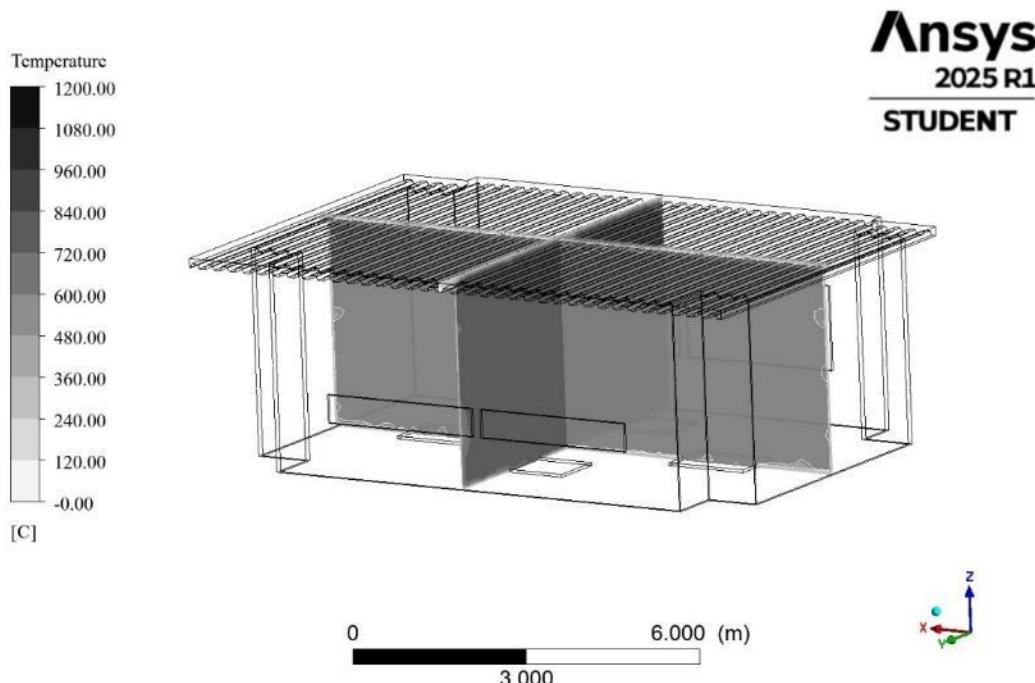


Figura 21. Distribución de temperatura en la simulación de validación

Dentro de esta Figura se colocaron dos planos que interceptan en el punto de estudio localizado a 3.11 metros con respecto al eje y, estos muestran la distribución térmica dentro de la estructura y como es que afecta en los diferentes puntos de la losacero.

La Figura 22 muestra el grafico obtenido de esta prueba, en él se encuentra la máxima temperatura al centro de la estructura, este dato será el comparativo con la máxima temperatura que obtuvo la prueba experimental.

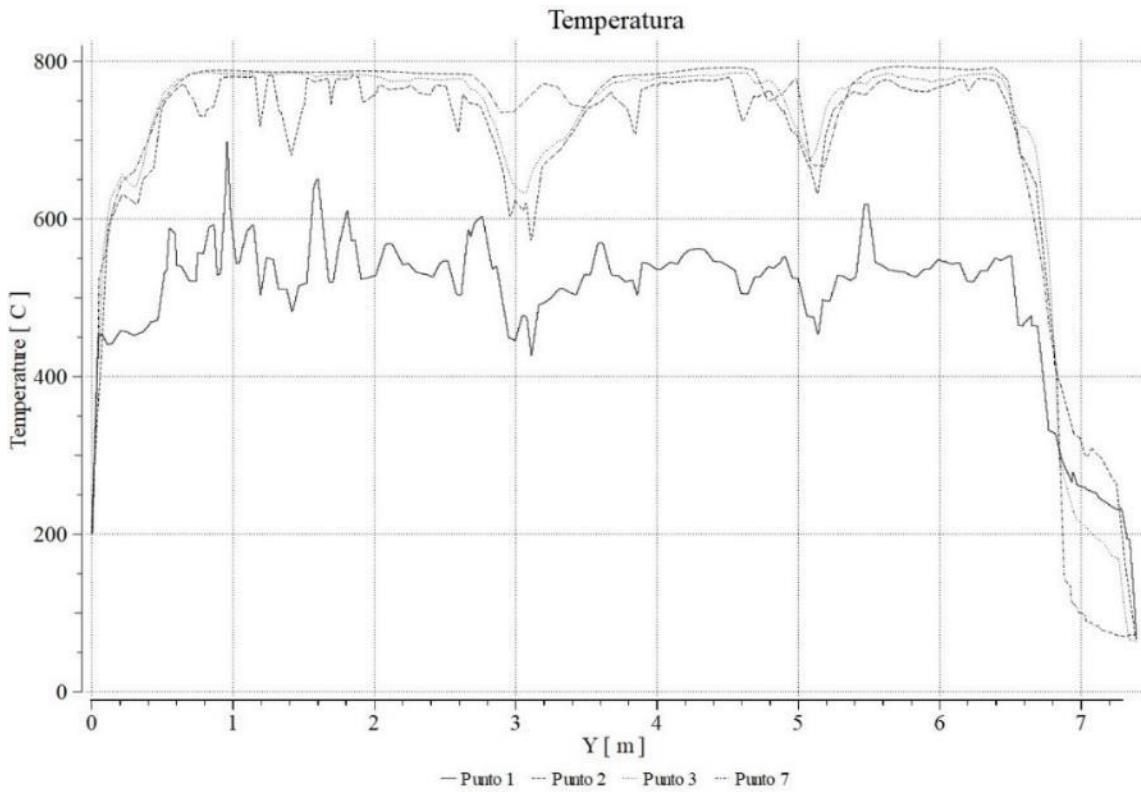


Figura 22. Gráfico de temperatura en la línea que representa el punto 1, 2, 3 y 7

Al obtener estos datos se realizó un comparativo entre lo simulado y lo experimental en los puntos 1, 2, 3 y 7 tal y como muestra la figura 23, se consideraron los valores máximos de cada grafico en dichas localizaciones y se obtuvo un porcentaje de coincidencia, la Tabla 2 muestra el porcentaje de variación que hay entre este conjunto de datos dictaminado el porcentaje de efectividad de esta simulación base.

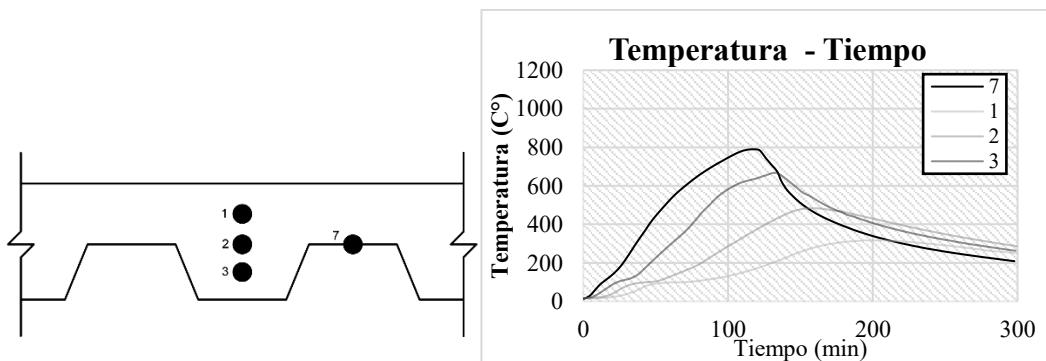


Figura 23. Puntos que consideró la validación de la simulación

Tabla 3 Datos comparativos entre experimentación y simulación

Punto	valor experimental (°C)	valor simulado (°C)	variación
1	355.61	427.31	83.22%
2	485.96	572.87	84.83%
3	635.46	654.41	97.10%
7	788.65	757.13	96.00%
	Total		90.29%

De acuerdo con diferentes métodos de validación matemático y experimental en simulaciones de CFD, se han obtenido resultados positivos con similitudes del 80 al 95 por ciento, esto generalmente varia a consideración de la persona que realiza el estudio, sin embargo, lo más relevante en estos estudios es la convergencia de la simulación [32], [33].

Teniendo en cuenta lo que se mencionó anteriormente y los resultados obtenidos en la simulación base, se puede afirmar que esta simulación tuvo una efectividad 90.29 %, por lo que esta serie de datos serán utilizados para las simulaciones específicas de cada caso.

5.2 Resultados de las simulaciones de diferentes fuentes de calor

Al tener en consideración una simulación que describe de manera cercana a las condiciones de la experimentación se desarrolló una para cada caso en particular utilizando diferentes números de fuentes de calor, respectando la temperatura de la fuente de calor inicial.

5.2.1 Caso 1 (C1)

Como se puede observar el primer caso de la simulación con una sola fuente de calor mostró un comportamiento uniforme con una distribución completa lo cual indica que una sola fuente de calor permite tener distribuciones uniformes como muestra la Figura 24.

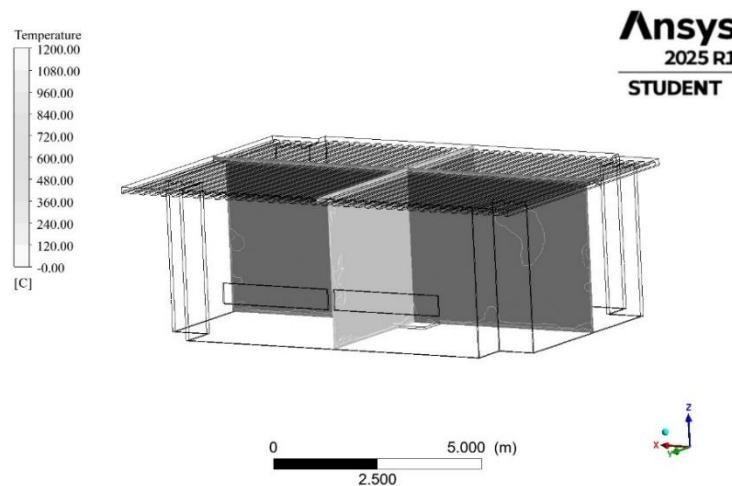


Figura 24. Simulación del caso C1

5.2.2 Caso 2 (C2)

En el segundo caso la figura 25 muestra una distribución uniforme sin embargo también muestra mayor intensidad en los focos de calor centrales lo cual ocasiona una mayor intensidad en el punto central de la losa cero comparado con el caso C1.

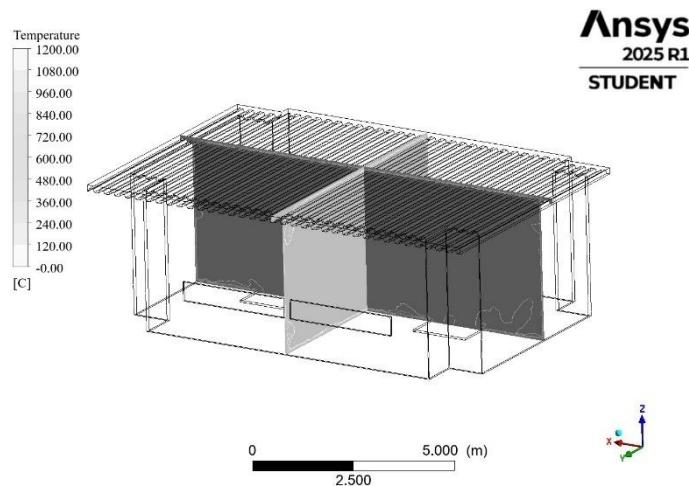


Figura 25. Simulación del caso C2

5.2.3 Caso 3 (C3)

El tercer caso al igual que los anteriores muestra una distribución uniforme, la Figura 26 indica un comportamiento de aumento en la temperatura del recinto, sin embargo, esto solo describe como es que calor se expande.

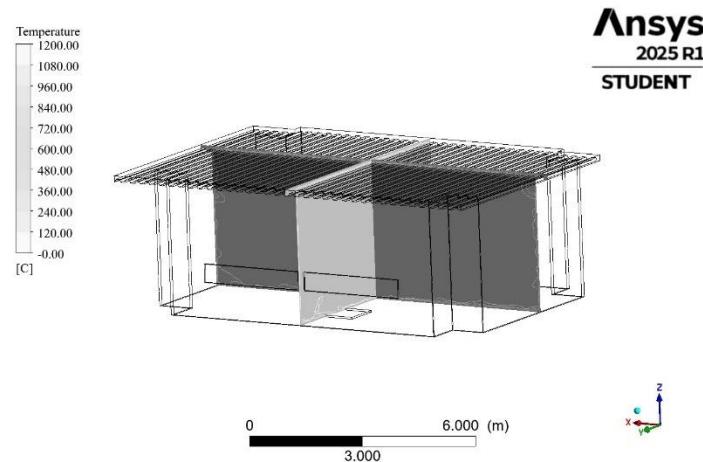


Figura 26. Simulación del caso C3

5.2.4 Caso 4 (C4)

El cuarto caso es el que se utilizó como simulación de calibración la cual muestra un aumento significativo de temperatura, con una distribución uniforme como muestra la Figura 27.

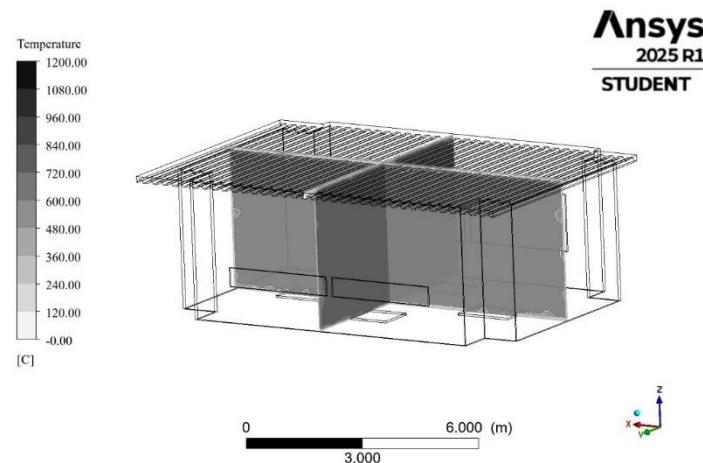


Figura 27. Simulación del caso C4 (Calibración)

5.2.5 Caso 5 (C5)

La Figura 28 muestra la última simulación elaborada para este caso de estudio el cual al igual que los casos anteriores muestra una distribución uniforme y un aumento de temperatura mayor al presentado en los casos anteriores.

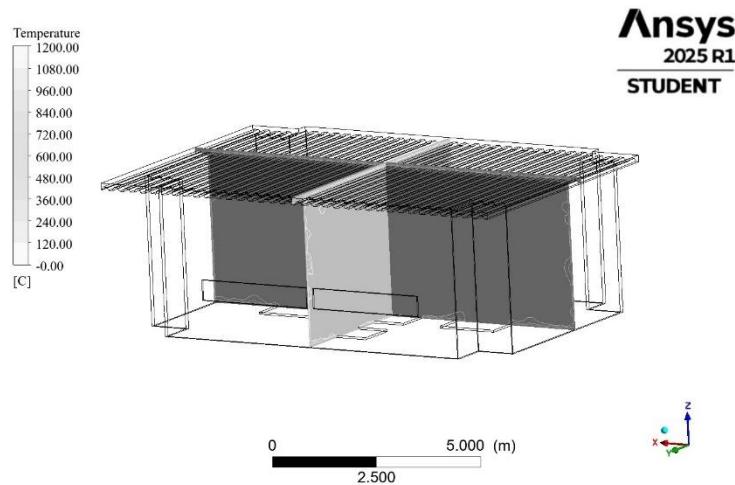


Figura 28. Simulación del caso C5

Aunque las diferentes figuras mostraron similitud en la distribución de temperatura y un aumento constante de la misma es importante resaltar que solo se ve por la escala de colores un comportamiento regular.

Sin embargo, el objeto de estudio principal es la losa cero, por ello en el siguiente apartado se analizó la temperatura que alcanzo en cada caso y su comparativo con el caso original.

5.3 Gráficos comparativos

Una vez obtenidos los resultados de cada simulación se procedió a realizar un cuadro comparativo con la información de cada temperatura máxima en cada escenario considerando la simulación del caso cuatro como la base de comparación.

La Tabla 4 muestra los datos arrojados por caso de simulación, considerando el caso cuatro como la base los comparativos entre cada resultado, se muestra la temperatura máxima en los puntos 1, 2, 3 y 7, su relación con las temperaturas de la simulación de calibración y un promedio que considera la efectividad total del sistema.

Tabla 4 Comparativo de temperatura máxima entre la simulación de calibración y las modificaciones

Número de fuentes de calor	Simulaciones								Tiempo [min]
	Temperatura máxima a 3.11 m [C°]				Porcentaje de efectividad				
	punto 1	punto 2	punto 3	punto 7	punto 1	punto 2	punto 3	punto 7	
1	413.51	612.42	719.97	780.23	96.77%	93.54%	90.89%	97.04%	94.56%
2	418.95	606.5	705.67	705.16	98.04%	94.46%	92.74%	93.14%	94.59%
3	470.33	674.23	786.07	756.91	90.85%	84.97%	83.25%	99.97%	89.76%
5	513.37	691.67	789.46	791.11	83.24%	82.82%	82.89%	95.70%	86.16%
4	427.31	572.87	654.41	757.13					85

Con los datos obtenidos en las diferentes simulaciones se desarrolló un gráfico comparativo mostrado en la Figura 29, que describe el número de simulaciones y el porcentaje de efectividad de cada caso de estudio y como el comportamiento del sistema.

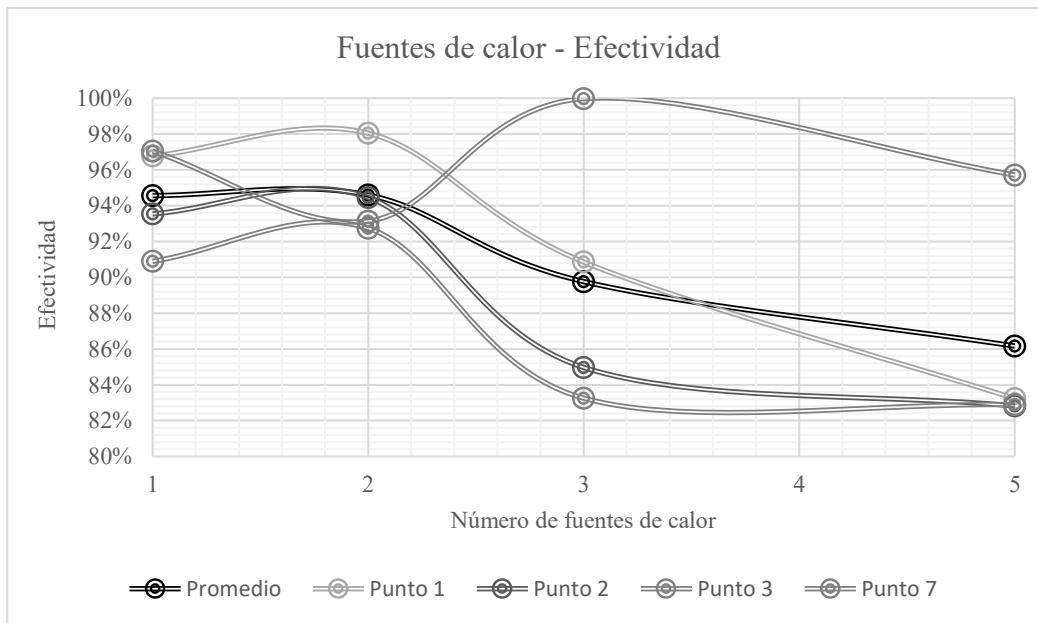


Figura 29. Gráfico comparativo

Debido a que la simulación con cuatro fuentes de calor es el caso de comparación, se puede observar que los valores cercanos a este fenómeno son de 1 a 2 fuentes de calor mostrando el mayor acercamiento a los resultados de la simulación original.

En la Figura 30 se puede observar otro grafico el cual relaciona la efectividad de cada propuesta y la cantidad de tiempo que se toma calcular las iteraciones esto quiere decir que este análisis solo abarca el tiempo que se realizaron cálculos, no se considera diseño, enmallado ni propuesta del método, características que comúnmente también toman tiempo y gasto computacional.

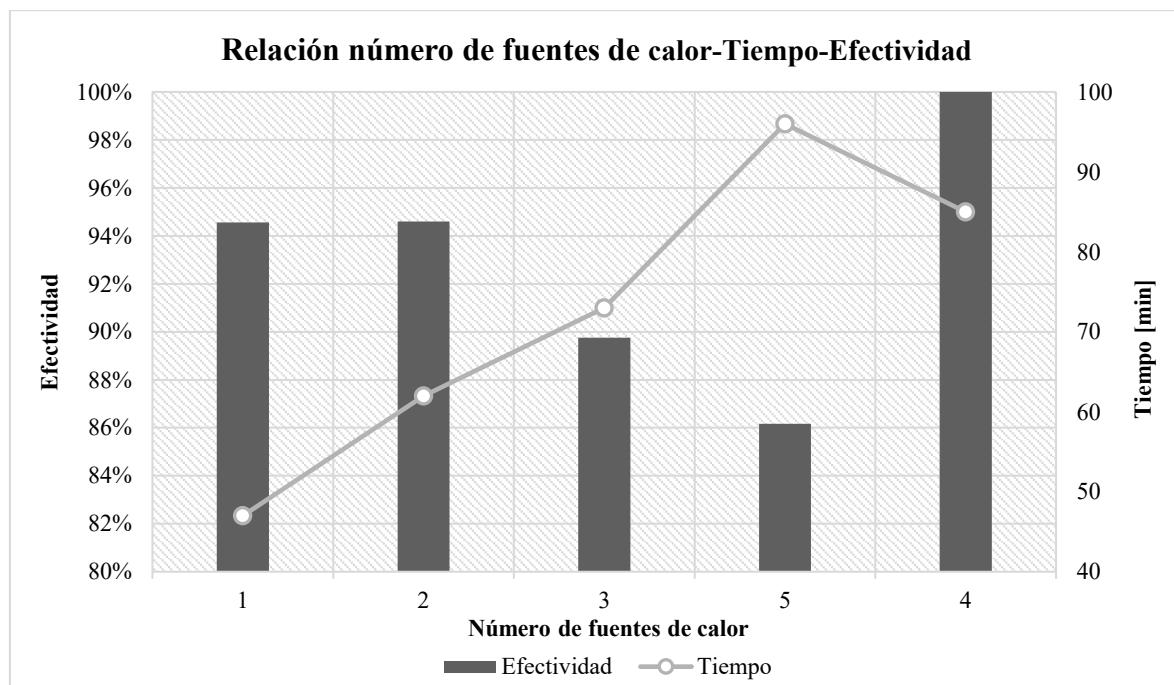


Ilustración 30 Grafico de relación entre fuentes de calor - efectividad- tiempo

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se demostró que una fuente de calor tiene un porcentaje mayor al 85% para describir el fenómeno de estudio, por lo que se cumplió la hipótesis con una sola fuente de calor, sin embargo, de acuerdo con la precisión que uno desee al realizar cálculos estructurales y querer tener un porcentaje más cercano al fenómeno estudiado es mejor utilizar más de una fuente de calor.

De acuerdo con diferentes estudios comúnmente se utiliza una fuente de calor determinada por un área pequeña esto permite ahorro de tiempo computacional y simulación con precisiones mayores al 85%, esto indica que para fenómenos de incendio controlado están dentro de una precisión deseada.

No obstante, el estudio presente se realizó bajo condiciones ideales donde se identificaba claramente la posición, tamaño y dimensión de fuente de calor, lo cual en un incendio sigue siendo aleatorio.

Debido a la información obtenida y considerando los argumentos anteriores se recomienda considerar dos fuentes de calor en cada área determinada con el objetivo de aumentar la precisión de la distribución térmica y no saturar una simulación ocasionando un desgaste computacional.

Los alcances del presente estudio se determinaron al proponer cinco escenarios diferentes, sin embargo, al saber que con dos fuentes de calor se obtiene una distribución aceptable es posible proponer nuevos escenarios que identifiquen factores que describan las situaciones de un incendio no controlado.

La distribución térmica en un elemento compuesto por acero y concreto es susceptible a perder su resistencia ante efectos de tensión, elementos donde el acero está directamente expuesto a altas temperaturas provoca inestabilidad en el sistema por ello es necesario considerar estudios que permitan describir fenómenos que no se pueden controlar y prevenir con diseños o materiales que aumente su resistencia y estabilidad.

REFERENCIAS

- [1] Consejo Nacional de Protección Contra Incendio, «Incendios urbanos en México». Accedido: 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://conapci.org/inicio/incendios-urbanos-en-mexico-_construccion/
- [2] T. Li *et al.*, «Large presence of bromine and toxic metals in ambient fine particles from urban fires», *Atmospheric Environment*, vol. 295, p. 119554, 2023, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119554.
- [3] E. G. Nawy y P. N. Balaguru, *Concreto reforzado: un enfoque básico*. 1988.
- [4] Ó. M. González Cuevas, *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*, Cuarta. LIMUSA, 2005.
- [5] J. Porto Quintián, *Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*. 2005.
- [6] R. Bayon, *La protección contra incendios en la construcción*, Editores Técnicos Asociados. Barcelona, 1978.
- [7] «Incendios | Portal UNAM». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unam.mx/medidas-de-emergencia/incendios>
- [8] D. J. Qin, P. F. Gao, F. Aslam, M. Sufian, y H. Alabduljabbar, «A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures», *Case Studies in Construction Materials*, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:245297079>
- [9] S. Murtiadi y A. Akmaluddin, «Performance of Concrete Building Structure Exposed to Localized Fire», *cea*, vol. 11, n.º 1, pp. 114-122, ene. 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110110.
- [10] G. Wang, D. Barber, P. Johnson, y M.-C. Hui, «Fire Safety Provisions for Aged Concrete Building Structures», *Procedia Engineering*, vol. 62, dic. 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.108.
- [11] L. O. Onundi, M. B. Oumarou, y A. M. Alkali, «Effects of Fire on the Strength of Reinforced Concrete Structural Members», *American Journal of Civil Engineering and Architecture*.
- [12] J. Wróblewska y R. Kowalski, «Assessing concrete strength in fire-damaged structures», *Construction and Building Materials*, vol. 254, pp. 119122-119122, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119122>.
- [13] L. Choe *et al.*, «Fire resilience of a steel-concrete composite floor system: full-scale experimental evaluation for influence of slab reinforcement (test #2)», National Institute of Standards and Technology (U.S.), Gaithersburg, MD, NIST TN 2203, jun. 2022. doi: 10.6028/NIST.TN.2203.

- [14] Min Seop Song, Il Woong Park, Eung Soo Kim, y Yeon-Gun Lee, «Numerical study on thermal-hydraulics of external reactor vessel cooling in high-power reactor using MARS-KS1.5 code: CFD-aided estimation of natural circulation flow rate», *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 54, n.^o 1, pp. 72-83, ene. 2022, doi: 10.1016/j.net.2021.07.037.
- [15] M. H. Zawawi *et al.*, «A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD)», presentado en GREEN DESIGN AND MANUFACTURE: ADVANCED AND EMERGING APPLICATIONS: Proceedings of the 4th International Conference on Green Design and Manufacture 2018, Ho Chi Minh, Vietnam, 2018, p. 020252. doi: 10.1063/1.5066893.
- [16] E. Quiroz-Pérez y J. A. de Lira-Flores, «Una revisión sobre el papel de la Dinámica Computacional de Fluidos en el análisis de la dispersión de gases tóxicos en plantas químicas», *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 7, n.^o 13, Art. n.^o 13, jul. 2024, doi: 10.61820/pct.v7i13.1351.
- [17] L. S. Taura, «The use of a continuity equation of fluid mechanics to reduce the abnormality of the cardiovascular system: A control mechanics of the human heart», *J. Biophys. Struct. Biol.*, vol. 4, n.^o 1, mar. 2012, doi: 10.5897/JBSB11.010.
- [18] V. Sergeev, N. Vatin, E. Kotov, D. Nemova, y S. Khorobrov, «Slug Regime Transitions in a Two-Phase Flow in Horizontal Round Pipe. CFD Simulations», *Applied Sciences*, vol. 10, n.^o 23, 2020, doi: 10.3390/app10238739.
- [19] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, 2nd ed. Harlow, England ; New York: Pearson Education Ltd, 2007.
- [20] M. Kisiel y D. Szpica, «Evaluating influence of CFD mesh on flow characteristics of pneumatic brake valve differential section», presentado en 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development, may 2024. doi: 10.22616/ERDev.2024.23.TF040.
- [21] M. Almlöv y D. Hammar, *CFD Simulation and analysis of windings cooling using ANSYS FLUENT*. 2024. Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-533402>
- [22] «1.3. Starting Fluent in Meshing Mode». Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=////Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/tgd_user_start.html
- [23] RK Singh y VM Joshi, «Validation of CFD and Thermal Hydraulics Codes by Digital Particle Image Velocimetry», *Energy Procedia*, vol. 7, pp. 650-652, ene. 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.06.087.
- [24] M. E. Saleta, D. Tobia, y S. Gil, «Experimental study of Bernoulli's equation with losses», *American Journal of Physics*, vol. 73, n.^o 7, pp. 598-602, jul. 2005, doi: 10.1119/1.1858486.

- [25] R. Aridi, S. Ali, T. Lemenand, J. Faraj, y M. Khaled, «CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers – A comparative study», *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, p. 100247, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100247>.
- [26] P. Kusriantoko, P. F. Daun, y K. E. Einarssrud, «A Comparative Study of Different CFD Codes for Fluidized Beds», *Dynamics*, vol. 4, n.^o 2, pp. 475-498, 2024, doi: 10.3390/dynamics4020025.
- [27] M. Nijemeisland y A. G. Dixon, «Comparison of CFD simulations to experiment for convective heat transfer in a gas–solid fixed bed», *Chemical Engineering Journal*, vol. 82, n.^o 1, pp. 231-246, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00360-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00360-0).
- [28] «automeris.io: Computer vision assisted data extraction from charts using WebPlotDigitizer». Accedido: 2 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://automeris.io/>
- [29] L. Wei y J. Honra, «Computational Fluid Dynamics Study on Bottom-Hole Multiphase Flow Fields Formed by Polycrystalline Diamond Compact Drill Bits in Foam Drilling», *Fluids*, vol. 9, n.^o 9, Art. n.^o 9, sep. 2024, doi: 10.3390/fluids9090211.
- [30] A. Pucciarelli *et al.*, «Coupled system thermal Hydraulics/CFD models: General guidelines and applications to heavy liquid metals», *Annals of Nuclear Energy*, vol. 153, p. 107990, abr. 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107990.
- [31] P. Wyszyński y R. Porowski, «Analysis of combustion models of hydrogen-air mixtures using ANSYS FLUENT», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2812, n.^o 1, p. 012016, ago. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2812/1/012016.
- [32] «(PDF) State-of-the-Art CFD Simulation: A Review of Techniques, Validation Methods, and Application Scenarios», *ResearchGate*, dic. 2024, doi: 10.46610/JoRTM.2024.v09i02.005.
- [33] A. Mitov, N. Nikolov, K. Nedelchev, y I. Kralov, «CFD Modeling and Experimental Validation of the Flow Processes of an External Gear Pump», *Processes*, vol. 12, n.^o 2, Art. n.^o 2, feb. 2024, doi: 10.3390/pr12020261.

7. APÉNDICE

7.1 Configuración de enmallado ANSYS *Fluent*

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron los siguientes valores específicos.

Fluid Flow (fluent) Meshing	
Elemento finito	Ortorrómbica simple
Tamaño del elemento finito	10 cm
Calidad del enmallado promedio	0.9

Condiciones de frontera	
Fuentes de calor	zona de calor
Muros	Muros
Extracción del volumen	air
Ventanas	Salida de calor

7.2 Configuración y propiedades de la simulación CFD en ANSYS *Fluent*

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron los siguientes datos y propiedades para cada simulación.

Estructura de los componentes de la simulación en ANSYS <i>Fluent</i>		
Elemento	Material	Conductividad térmica
Losacero	Acero	50 W/m.K
Losa	Concreto	1.5 W/m.K
Muros	Concreto	1.5 W/m.K
Columnas	Acero	60 W/m.K
Interior del recinto	Aire	0.025 W/m.K
Elemento	Material	Temperatura
Losacero	Acero	25 °C
Losa	Concreto	25°C
Muros	Concreto	25 °C
Columnas	Acero	25 °C
Interior del recinto	Aire	20 °C
Zona de calor	Acero	950 °C

Modelos	
Energía	Aplicado
Viscosidad	laminar
Radiación	De superficie a superficie
Residuales	
Continuidad	0.00001
Velocidad-x	0.00001
Velocidad-y	0.00001
Velocidad-z	0.00001
Energía	0.00001

7.3 Datos de temperatura simulación con una fuente de calor

Punto 1 at /LINE:Punto 1		Punto 2 at /LINE:Punto 2		Punto 3 at /LINE:Punto 3		Punto 7 at /LINE:Punto 7	
Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]
4.00	481.42	4.00	726.82	4.00	750.75	4.00	712.59
3.99	480.82	3.99	725.30	3.99	750.19	3.99	708.88
3.99	480.15	3.99	724.09	3.99	747.50	3.99	705.86
3.98	478.84	3.98	722.57	3.98	744.82	3.98	703.88
3.97	477.53	3.97	719.85	3.97	742.13	3.97	702.05
3.97	476.22	3.97	717.14	3.97	739.45	3.97	700.23
3.96	474.91	3.96	714.43	3.96	736.77	3.96	698.40
3.95	473.59	3.95	711.71	3.95	734.08	3.95	696.57
3.94	472.28	3.94	709.00	3.94	731.74	3.94	694.75
3.94	470.97	3.94	706.29	3.94	730.64	3.94	692.92
3.93	469.94	3.93	703.57	3.93	729.54	3.93	691.09
3.92	469.29	3.92	700.86	3.92	728.43	3.92	689.27
3.91	468.64	3.91	698.15	3.91	727.33	3.91	687.44
3.91	467.99	3.91	695.55	3.91	726.22	3.91	685.61
3.90	467.34	3.90	693.93	3.90	725.21	3.90	683.78
3.89	466.81	3.89	694.05	3.89	724.42	3.89	682.24
3.88	457.64	3.88	686.99	3.88	724.59	3.88	682.40
3.88	447.93	3.88	677.27	3.88	724.75	3.88	682.79
3.87	438.20	3.87	667.56	3.87	724.91	3.87	683.18
3.86	430.12	3.86	657.84	3.86	725.08	3.86	683.58
3.85	426.87	3.85	648.12	3.85	725.25	3.85	683.97
3.85	430.37	3.85	638.41	3.85	725.43	3.85	684.36
3.84	433.87	3.84	639.07	3.84	725.61	3.84	684.75
3.83	437.37	3.83	642.57	3.83	725.79	3.83	685.14

3.82	440.87	3.82	646.07	3.82	725.97	3.82	685.53
3.82	441.02	3.82	649.57	3.82	725.04	3.82	685.92
3.81	440.56	3.81	653.06	3.81	723.95	3.81	686.32
3.80	440.11	3.80	656.56	3.80	722.87	3.80	686.71
3.79	439.65	3.79	660.06	3.79	721.78	3.79	687.10
3.79	439.19	3.79	663.56	3.79	720.70	3.79	689.45
3.78	438.92	3.78	663.23	3.78	719.81	3.78	692.97
3.77	438.78	3.77	665.11	3.77	719.04	3.77	696.47
3.77	440.43	3.77	667.16	3.77	718.27	3.77	699.98
3.76	442.48	3.76	669.21	3.76	717.50	3.76	703.48
3.75	444.52	3.75	671.25	3.75	716.73	3.75	706.98
3.74	446.57	3.74	673.30	3.74	715.96	3.74	710.49
3.74	448.62	3.74	675.35	3.74	716.04	3.74	713.99
3.73	450.67	3.73	677.40	3.73	716.82	3.73	717.49
3.72	452.71	3.72	679.44	3.72	717.60	3.72	721.00
3.71	453.32	3.71	681.49	3.71	718.38	3.71	724.50
3.71	453.58	3.71	683.54	3.71	719.16	3.71	728.00
3.70	453.83	3.70	685.58	3.70	719.94	3.70	731.51
3.32	490.73	3.32	720.40	3.32	743.04	3.32	761.79
3.31	490.47	3.31	717.95	3.31	741.74	3.31	760.41
3.31	490.21	3.31	716.05	3.31	740.44	3.31	759.03
3.30	488.88	3.30	714.14	3.30	739.02	3.30	757.65
3.29	488.02	3.29	713.46	3.29	737.75	3.29	756.63
3.28	486.99	3.28	712.79	3.28	737.12	3.28	757.06
3.28	485.97	3.28	712.12	3.28	736.49	3.28	758.00
3.27	484.95	3.27	711.45	3.27	735.86	3.27	758.95
3.26	483.93	3.26	710.77	3.26	735.24	3.26	759.90
3.25	482.91	3.25	710.10	3.25	734.61	3.25	760.85
3.25	481.89	3.25	709.43	3.25	733.88	3.25	761.80
3.24	480.87	3.24	708.75	3.24	731.75	3.24	762.74
3.23	481.04	3.23	708.08	3.23	729.62	3.23	763.69
3.23	481.07	3.23	707.41	3.23	727.48	3.23	764.64
3.22	481.11	3.22	706.74	3.22	725.35	3.22	765.59
3.21	481.14	3.21	706.14	3.21	723.22	3.21	766.53
3.20	481.17	3.20	704.84	3.20	721.08	3.20	767.48
3.20	480.83	3.20	704.09	3.20	718.95	3.20	768.43
3.19	480.40	3.19	704.75	3.19	719.57	3.19	769.22
3.18	479.97	3.18	700.26	3.18	720.13	3.18	770.24
3.17	479.54	3.17	690.42	3.17	720.68	3.17	771.24
3.17	479.11	3.17	680.58	3.17	721.23	3.17	772.24
3.16	478.68	3.16	670.74	3.16	721.79	3.16	773.24

3.15	468.52	3.15	660.90	3.15	722.34	3.15	774.24
3.14	458.68	3.14	651.07	3.14	722.87	3.14	775.23
3.14	448.84	3.14	641.23	3.14	723.37	3.14	776.23
3.13	439.00	3.13	631.39	3.13	723.86	3.13	777.23
3.12	429.16	3.12	621.55	3.12	722.61	3.12	778.23
3.11	419.32	3.11	611.71	3.11	721.29	3.11	779.23
3.11	413.51	3.11	612.42	3.11	719.97	3.11	780.23
3.10	434.23	3.10	633.14	3.10	717.47	3.10	781.23
2.69	561.63	2.69	741.88	2.69	764.41	2.69	788.19
2.69	558.64	2.69	744.59	2.69	767.11	2.69	788.14
2.68	556.08	2.68	747.29	2.68	769.65	2.68	788.08

7.4 Datos de temperatura simulación con dos fuentes de calor

Punto 1 at /LINE:Punto 1		Punto 2 at /LINE:Punto 2		Punto 3 at /LINE:Punto 3		Punto 7 at /LINE:Punto 7	
Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]
4.00	496.38	4.00	753.18	4.00	767.98	4.00	789.16
3.99	496.50	3.99	753.12	3.99	767.24	3.99	789.10
3.99	496.66	3.99	753.35	3.99	765.91	3.99	789.03
3.98	497.06	3.98	753.25	3.98	764.59	3.98	788.87
3.97	497.46	3.97	751.90	3.97	763.26	3.97	788.71
3.97	497.86	3.97	750.54	3.97	761.94	3.97	788.54
3.96	498.27	3.96	749.19	3.96	760.61	3.96	788.37
3.95	498.67	3.95	747.84	3.95	759.28	3.95	788.20
3.94	499.07	3.94	746.48	3.94	758.04	3.94	788.03
3.94	499.48	3.94	745.13	3.94	757.07	3.94	787.86
3.93	499.94	3.93	743.78	3.93	756.10	3.93	787.69
3.92	500.50	3.92	742.42	3.92	755.13	3.92	787.52
3.91	501.05	3.91	741.07	3.91	754.17	3.91	787.36
3.91	501.61	3.91	739.73	3.91	753.20	3.91	787.19
3.90	502.16	3.90	738.43	3.90	752.27	3.90	787.02
3.89	501.91	3.89	738.44	3.89	751.49	3.89	786.86
3.88	491.39	3.88	730.25	3.88	751.63	3.88	786.74
3.88	480.17	3.88	719.03	3.88	751.78	3.88	786.60
3.87	468.91	3.87	707.81	3.87	751.92	3.87	786.46
3.86	459.28	3.86	696.58	3.86	752.07	3.86	786.32
3.85	455.36	3.85	685.36	3.85	751.91	3.85	786.18
3.85	459.36	3.85	674.14	3.85	751.09	3.85	786.04
3.84	463.36	3.84	674.89	3.84	750.28	3.84	785.90
3.83	467.35	3.83	678.92	3.83	749.46	3.83	785.76
3.82	471.35	3.82	682.94	3.82	748.64	3.82	785.62

3.82	471.98	3.82	686.96	3.82	747.18	3.82	785.48
3.81	471.98	3.81	690.98	3.81	745.63	3.81	785.34
3.80	471.99	3.80	695.00	3.80	744.09	3.80	785.20
3.79	472.00	3.79	699.02	3.79	742.54	3.79	785.06
3.79	472.01	3.79	703.04	3.79	740.99	3.79	784.97
3.78	472.50	3.78	703.66	3.78	739.46	3.78	784.93
3.77	473.34	3.77	704.39	3.77	738.04	3.77	784.90
3.77	474.20	3.77	705.26	3.77	736.61	3.77	784.86
3.76	475.06	3.76	706.13	3.76	735.19	3.76	784.83
3.75	475.93	3.75	707.00	3.75	733.77	3.75	784.79
3.74	476.80	3.74	707.87	3.74	732.34	3.74	784.76
3.74	477.67	3.74	708.74	3.74	731.40	3.74	784.72
3.73	478.54	3.73	709.61	3.73	730.85	3.73	784.68
3.72	479.40	3.72	710.48	3.72	730.31	3.72	784.65
3.71	479.31	3.71	711.35	3.71	729.77	3.71	784.61
3.71	478.97	3.71	712.22	3.71	729.22	3.71	784.58
3.70	478.63	3.70	713.08	3.70	728.68	3.70	784.54
3.69	478.37	3.69	713.95	3.69	728.13	3.69	784.46
3.68	478.35	3.68	715.11	3.68	727.46	3.68	784.39
3.68	478.33	3.68	720.83	3.68	726.64	3.68	784.29
3.67	480.36	3.67	720.36	3.67	725.83	3.67	784.19
3.66	486.32	3.66	719.77	3.66	725.02	3.66	784.09
3.65	492.27	3.65	719.19	3.65	724.20	3.65	783.99
3.65	498.23	3.65	718.61	3.65	723.39	3.65	783.89
3.64	504.19	3.64	718.03	3.64	722.58	3.64	783.79
3.63	510.15	3.63	717.45	3.63	722.00	3.63	783.69
3.62	516.11	3.62	716.87	3.62	721.42	3.62	783.59
3.62	522.06	3.62	716.28	3.62	720.84	3.62	783.49
3.61	525.14	3.61	715.70	3.61	720.26	3.61	783.38
3.60	525.25	3.60	715.12	3.60	719.68	3.60	783.28
3.60	525.35	3.60	714.85	3.60	719.16	3.60	783.18
3.59	525.11	3.59	714.87	3.59	719.08	3.59	783.02
3.58	524.87	3.58	715.37	3.58	719.59	3.58	782.78
3.57	521.67	3.57	715.88	3.57	720.09	3.57	782.54
3.57	516.88	3.57	716.38	3.57	720.60	3.57	782.30
3.56	512.09	3.56	716.89	3.56	721.10	3.56	782.06
3.55	507.30	3.55	717.39	3.55	721.61	3.55	781.82
3.54	502.51	3.54	717.90	3.54	720.85	3.54	781.58
3.54	497.72	3.54	718.40	3.54	719.07	3.54	781.34
3.53	492.93	3.53	718.91	3.53	717.29	3.53	781.10
3.52	490.36	3.52	719.41	3.52	715.51	3.52	780.86

3.51	490.47	3.51	719.92	3.51	713.73	3.51	780.62
3.51	490.58	3.51	719.89	3.51	711.95	3.51	780.38
3.50	490.70	3.50	719.07	3.50	710.17	3.50	780.14
3.49	490.81	3.49	718.54	3.49	709.34	3.49	779.68
3.48	491.16	3.48	718.02	3.48	708.82	3.48	778.89
3.48	491.66	3.48	717.46	3.48	708.29	3.48	777.87
3.47	489.75	3.47	716.97	3.47	707.77	3.47	776.85
3.46	487.83	3.46	716.46	3.46	707.25	3.46	775.82
3.45	485.91	3.45	715.95	3.45	706.72	3.45	774.80
3.45	483.99	3.45	715.44	3.45	706.20	3.45	773.78
3.44	482.07	3.44	714.93	3.44	705.70	3.44	772.76
3.43	480.15	3.43	714.42	3.43	705.23	3.43	771.73
3.43	478.23	3.43	713.91	3.43	704.76	3.43	770.71
3.42	476.60	3.42	713.40	3.42	704.29	3.42	769.69
3.41	477.11	3.41	711.30	3.41	703.82	3.41	768.67
3.40	477.38	3.40	709.41	3.40	703.35	3.40	767.64
3.40	477.65	3.40	712.04	3.40	702.83	3.40	766.62
3.39	477.92	3.39	711.39	3.39	702.06	3.39	765.39
3.38	479.48	3.38	710.71	3.38	701.38	3.38	763.50
3.37	481.93	3.37	710.03	3.37	700.70	3.37	761.59
3.37	484.38	3.37	709.35	3.37	700.02	3.37	759.69
3.36	486.84	3.36	708.66	3.36	699.33	3.36	757.78
3.35	489.29	3.35	707.98	3.35	698.65	3.35	755.88
3.34	491.74	3.34	707.30	3.34	698.52	3.34	753.97
3.34	494.20	3.34	706.62	3.34	698.64	3.34	752.06
3.33	496.38	3.33	705.94	3.33	698.75	3.33	750.16
3.32	496.18	3.32	705.25	3.32	698.86	3.32	748.25
3.31	495.98	3.31	704.57	3.31	698.97	3.31	746.35
3.31	495.78	3.31	704.34	3.31	699.08	3.31	744.44
3.30	495.51	3.30	704.46	3.30	699.21	3.30	742.53
3.29	494.91	3.29	703.96	3.29	699.03	3.29	740.67
3.28	494.05	3.28	703.47	3.28	698.55	3.28	738.53
3.28	493.19	3.28	702.98	3.28	698.06	3.28	736.39
3.27	492.34	3.27	702.48	3.27	697.58	3.27	734.25
3.26	491.48	3.26	701.99	3.26	697.09	3.26	732.11
3.25	490.62	3.25	701.50	3.25	696.61	3.25	729.97
3.25	489.76	3.25	701.00	3.25	696.15	3.25	727.83
3.24	488.91	3.24	700.51	3.24	696.08	3.24	725.68
3.23	488.08	3.23	700.02	3.23	696.02	3.23	723.54
3.23	487.27	3.23	699.52	3.23	695.95	3.23	721.40
3.22	486.46	3.22	699.06	3.22	695.89	3.22	719.26

3.21	485.66	3.21	698.55	3.21	695.82	3.21	717.12
3.20	484.85	3.20	698.34	3.20	695.76	3.20	714.98
3.20	484.61	3.20	698.85	3.20	695.77	3.20	712.83
3.19	484.67	3.19	699.64	3.19	696.67	3.19	711.73
3.18	484.74	3.18	695.15	3.18	697.55	3.18	711.14
3.17	484.80	3.17	685.16	3.17	698.44	3.17	710.54
3.17	484.87	3.17	675.17	3.17	699.33	3.17	709.94
3.16	484.93	3.16	665.17	3.16	700.22	3.16	709.34
3.15	474.60	3.15	655.18	3.15	701.11	3.15	708.75
3.14	464.61	3.14	645.19	3.14	702.01	3.14	708.15
3.14	454.61	3.14	635.20	3.14	702.89	3.14	707.55
3.13	444.62	3.13	625.20	3.13	703.78	3.13	706.95
3.12	434.63	3.12	615.21	3.12	704.42	3.12	706.36
3.11	424.64	3.11	605.22	3.11	705.04	3.11	705.76
3.11	418.95	3.11	606.50	3.11	705.67	3.11	705.16
3.10	441.59	3.10	629.14	3.10	705.42	3.10	704.56
3.09	464.24	3.09	651.79	3.09	705.00	3.09	704.41
3.08	486.88	3.08	674.43	3.08	704.63	3.08	704.78
3.08	509.53	3.08	697.08	3.08	704.27	3.08	705.30
3.07	516.35	3.07	707.08	3.07	704.40	3.07	705.83
3.06	518.21	3.06	707.01	3.06	705.12	3.06	706.35
3.06	518.13	3.06	706.67	3.06	705.83	3.06	706.87
3.05	518.04	3.05	707.38	3.05	706.55	3.05	707.40
3.04	513.45	3.04	707.82	3.04	707.26	3.04	707.92
3.03	503.74	3.03	708.19	3.03	707.97	3.03	708.44
3.03	494.03	3.03	708.55	3.03	708.69	3.03	708.97
3.02	484.32	3.02	708.92	3.02	709.38	3.02	709.49
3.01	474.61	3.01	709.29	3.01	709.74	3.01	710.01
3.00	464.90	3.00	709.66	3.00	710.13	3.00	710.54
3.00	455.19	3.00	710.03	3.00	710.52	3.00	711.06

7.5 Datos de temperatura simulación con tres fuentes de calor

Punto 1 at /LINE:Punto 1		Punto 2 at /LINE:Punto 2		Punto 3 at /LINE:Punto 3		Punto 7 at /LINE:Punto 7	
Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]
4.00	495.53	4.00	719.56	4.00	741.00	4.00	758.00
3.99	495.34	3.99	721.45	3.99	745.52	3.99	762.68
3.99	495.39	3.99	723.57	3.99	746.58	3.99	766.18
3.98	497.93	3.98	725.45	3.98	747.65	3.98	767.60

3.97	500.47	3.97	726.44	3.97	748.71	3.97	768.94
3.97	503.01	3.97	727.42	3.97	749.77	3.97	770.28
3.96	505.55	3.96	728.41	3.96	750.83	3.96	771.61
3.95	508.09	3.95	729.40	3.95	751.90	3.95	772.95
3.94	510.64	3.94	730.39	3.94	752.93	3.94	774.29
3.94	513.18	3.94	731.37	3.94	753.84	3.94	775.63
3.93	514.71	3.93	732.36	3.93	754.76	3.93	776.97
3.92	514.91	3.92	733.35	3.92	755.68	3.92	778.31
3.91	515.10	3.91	734.34	3.91	756.59	3.91	779.65
3.91	515.30	3.91	734.99	3.91	757.51	3.91	780.99
3.90	515.50	3.90	733.84	3.90	758.46	3.90	782.33
3.89	513.99	3.89	733.69	3.89	757.75	3.89	783.50
3.88	505.14	3.88	726.75	3.88	758.15	3.88	783.80
3.88	495.69	3.88	717.30	3.88	758.55	3.88	783.92
3.87	486.16	3.87	707.85	3.87	758.95	3.87	784.04
3.86	477.76	3.86	698.40	3.86	759.35	3.86	784.16
3.85	472.95	3.85	688.96	3.85	759.11	3.85	784.28
3.85	473.20	3.85	679.51	3.85	757.49	3.85	784.40
3.84	473.46	3.84	677.70	3.84	755.86	3.84	784.52
3.83	473.72	3.83	677.97	3.83	754.24	3.83	784.65
3.82	473.97	3.82	678.25	3.82	752.61	3.82	784.77
3.82	473.93	3.82	678.52	3.82	748.36	3.82	784.89
3.81	473.82	3.81	678.79	3.81	743.74	3.81	785.01
3.80	473.72	3.80	679.07	3.80	739.12	3.80	785.13
3.79	473.62	3.79	679.34	3.79	734.50	3.79	785.25
3.79	473.52	3.79	679.62	3.79	729.89	3.79	785.35
3.78	473.84	3.78	679.72	3.78	725.69	3.78	785.09
3.77	474.47	3.77	678.39	3.77	722.07	3.77	784.80
3.77	473.55	3.77	677.12	3.77	718.46	3.77	784.51
3.76	472.27	3.76	675.85	3.76	714.84	3.76	784.22
3.75	471.00	3.75	674.57	3.75	711.23	3.75	783.94
3.74	469.73	3.74	673.30	3.74	707.61	3.74	783.65
3.74	468.45	3.74	672.03	3.74	704.67	3.74	783.36
3.73	467.18	3.73	670.76	3.73	702.29	3.73	783.07
3.72	465.91	3.72	669.49	3.72	699.90	3.72	782.79
3.71	465.88	3.71	668.22	3.71	697.52	3.71	782.50
3.71	466.16	3.71	666.94	3.71	695.14	3.71	782.21
3.70	466.43	3.70	665.67	3.70	692.76	3.70	781.92
3.69	466.62	3.69	664.40	3.69	690.37	3.69	781.67
3.68	466.46	3.68	664.09	3.68	688.16	3.68	781.16
3.68	466.30	3.68	665.71	3.68	686.22	3.68	780.29

3.67	466.81	3.67	662.82	3.67	684.27	3.67	779.41
3.66	468.60	3.66	659.77	3.66	682.32	3.66	778.53
3.65	470.38	3.65	656.72	3.65	680.38	3.65	777.66
3.65	472.17	3.65	653.67	3.65	678.43	3.65	776.78
3.64	473.96	3.64	650.62	3.64	676.51	3.64	775.91
3.63	475.74	3.63	647.57	3.63	673.41	3.63	775.03
3.62	477.53	3.62	644.52	3.62	670.36	3.62	774.15
3.62	479.32	3.62	641.47	3.62	667.31	3.62	773.28
3.61	480.09	3.61	638.42	3.61	664.26	3.61	772.40
3.60	479.82	3.60	635.37	3.60	661.21	3.60	771.52
3.60	479.58	3.60	632.93	3.60	658.29	3.60	770.65
3.59	479.73	3.59	631.79	3.59	656.71	3.59	769.61
3.58	479.88	3.58	633.05	3.58	657.96	3.58	767.67
3.57	478.23	3.57	634.30	3.57	659.22	3.57	765.70
3.57	475.60	3.57	635.56	3.57	660.47	3.57	763.73
3.56	472.98	3.56	636.81	3.56	661.73	3.56	761.76
3.55	470.36	3.55	638.07	3.55	662.98	3.55	759.79
3.54	467.74	3.54	639.32	3.54	664.13	3.54	757.82
3.54	465.11	3.54	640.58	3.54	666.01	3.54	755.85
3.53	462.49	3.53	641.83	3.53	667.90	3.53	753.88
3.52	461.04	3.52	643.09	3.52	669.79	3.52	751.91
3.51	461.03	3.51	644.34	3.51	671.67	3.51	749.94
3.51	461.01	3.51	645.51	3.51	673.56	3.51	747.97
3.50	460.99	3.50	648.89	3.50	675.45	3.50	746.00
3.49	460.97	3.49	652.97	3.49	678.65	3.49	743.89
3.48	461.04	3.48	657.05	3.48	682.73	3.48	740.40
3.48	461.99	3.48	661.21	3.48	686.81	3.48	736.68
3.47	464.98	3.47	665.21	3.47	690.89	3.47	732.96
3.46	467.98	3.46	669.25	3.46	694.97	3.46	729.24
3.45	470.98	3.45	673.29	3.45	699.05	3.45	725.51
3.45	473.97	3.45	677.32	3.45	703.14	3.45	721.79
3.44	476.97	3.44	681.36	3.44	706.26	3.44	718.07
3.43	479.96	3.43	685.40	3.43	708.65	3.43	714.35
3.43	482.96	3.43	689.43	3.43	711.05	3.43	710.63
3.42	484.02	3.42	693.47	3.42	713.44	3.42	706.90
3.41	483.64	3.41	696.36	3.41	715.83	3.41	703.18
3.40	483.39	3.40	699.40	3.40	718.22	3.40	699.46
3.40	483.14	3.40	702.57	3.40	720.52	3.40	695.74
3.39	482.89	3.39	702.90	3.39	720.85	3.39	691.99
3.38	484.43	3.38	703.27	3.38	721.22	3.38	688.88
3.37	487.21	3.37	703.64	3.37	721.59	3.37	685.75

3.37	490.00	3.37	704.01	3.37	721.96	3.37	682.61
3.36	492.79	3.36	704.38	3.36	722.33	3.36	679.48
3.35	495.57	3.35	704.75	3.35	722.70	3.35	676.35
3.34	498.36	3.34	705.13	3.34	724.78	3.34	673.22
3.34	501.15	3.34	705.50	3.34	727.59	3.34	670.09
3.33	503.69	3.33	705.87	3.33	730.40	3.33	666.95
3.32	504.08	3.32	706.24	3.32	733.21	3.32	663.82
3.31	504.47	3.31	706.61	3.31	736.02	3.31	660.69
3.31	504.86	3.31	707.36	3.31	738.83	3.31	657.56
3.30	506.14	3.30	708.73	3.30	741.42	3.30	654.42
3.29	508.42	3.29	711.59	3.29	743.58	3.29	652.62
3.28	510.97	3.28	714.45	3.28	746.53	3.28	653.97
3.28	513.52	3.28	717.31	3.28	749.47	3.28	657.50
3.27	516.07	3.27	720.17	3.27	752.42	3.27	661.03
3.26	518.62	3.26	723.04	3.26	755.36	3.26	664.56
3.25	521.17	3.25	725.90	3.25	758.31	3.25	668.09
3.25	523.72	3.25	728.76	3.25	761.12	3.25	671.61
3.24	526.27	3.24	731.62	3.24	761.95	3.24	675.14
3.23	526.73	3.23	734.48	3.23	762.79	3.23	678.67
3.23	526.78	3.23	737.34	3.23	763.62	3.23	682.20
3.22	526.84	3.22	740.23	3.22	764.45	3.22	685.73
3.21	526.89	3.21	743.21	3.21	765.28	3.21	689.26
3.20	526.95	3.20	745.00	3.20	766.11	3.20	692.78
3.20	526.59	3.20	746.22	3.20	766.77	3.20	696.31
3.19	526.05	3.19	748.50	3.19	768.97	3.19	701.17
3.18	525.51	3.18	745.66	3.18	771.11	3.18	706.24
3.17	524.97	3.17	737.48	3.17	773.25	3.17	711.31
3.17	524.42	3.17	729.30	3.17	775.39	3.17	716.37
3.16	523.90	3.16	721.13	3.16	777.53	3.16	721.44
3.15	515.45	3.15	712.95	3.15	779.68	3.15	726.51
3.14	507.27	3.14	704.78	3.14	781.82	3.14	731.57
3.14	499.09	3.14	696.60	3.14	783.85	3.14	736.64
3.13	490.92	3.13	688.42	3.13	785.91	3.13	741.71
3.12	482.74	3.12	680.25	3.12	786.02	3.12	746.77
3.11	474.56	3.11	672.07	3.11	786.04	3.11	751.84
3.11	470.33	3.11	674.23	3.11	786.07	3.11	756.91
3.10	492.08	3.10	695.98	3.10	784.66	3.10	761.97
3.09	513.83	3.09	717.73	3.09	782.95	3.09	765.92
3.08	535.58	3.08	739.48	3.08	781.30	3.08	767.60
3.08	557.33	3.08	761.22	3.08	779.65	3.08	768.54
3.07	564.59	3.07	770.60	3.07	778.76	3.07	769.48

3.06	567.20	3.06	769.69	3.06	778.75	3.06	770.42
3.06	567.60	3.06	768.07	3.06	778.74	3.06	771.37
3.05	567.99	3.05	768.07	3.05	778.73	3.05	772.31
3.04	563.38	3.04	767.77	3.04	778.72	3.04	773.25
3.03	553.07	3.03	767.40	3.03	778.71	3.03	774.19
3.03	542.77	3.03	767.02	3.03	778.70	3.03	775.14
3.02	532.46	3.02	766.65	3.02	778.67	3.02	776.08
3.01	522.16	3.01	766.28	3.01	778.30	3.01	777.02
3.00	511.85	3.00	765.91	3.00	777.89	3.00	777.96
3.00	501.55	3.00	765.55	3.00	777.46	3.00	778.90

7.6 Datos de temperatura simulación con cuatro fuentes de calor

Punto 1 at P1		Punto 2 at P2		Punto 3 at P3		Punto 7 at P7	
Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]
4.00	536.28	4.00	768.66	4.00	779.39	4.00	783.92
3.99	536.41	3.99	769.27	3.99	779.22	3.99	783.77
3.99	536.61	3.99	770.15	3.99	778.62	3.99	783.63
3.98	537.54	3.98	770.71	3.98	778.02	3.98	783.55
3.97	538.46	3.97	770.09	3.97	777.42	3.97	783.48
3.97	539.39	3.97	769.46	3.97	776.83	3.97	783.40
3.96	540.31	3.96	768.84	3.96	776.23	3.96	783.33
3.95	541.23	3.95	768.22	3.95	775.63	3.95	783.26
3.94	542.16	3.94	767.59	3.94	775.16	3.94	783.18
3.94	543.08	3.94	766.97	3.94	775.13	3.94	783.11
3.93	543.69	3.93	766.34	3.93	775.10	3.93	783.04
3.92	543.89	3.92	765.72	3.92	775.06	3.92	782.96
3.91	544.09	3.91	765.10	3.91	775.03	3.91	782.89
3.91	544.28	3.91	764.50	3.91	775.00	3.91	782.82
3.90	544.48	3.90	764.23	3.90	774.99	3.90	782.75
3.89	544.33	3.89	764.73	3.89	775.22	3.89	782.68
3.88	535.04	3.88	757.59	3.88	775.94	3.88	782.63
3.88	525.08	3.88	747.63	3.88	776.67	3.88	782.57
3.87	515.10	3.87	737.67	3.87	777.39	3.87	782.52
3.86	506.67	3.86	727.71	3.86	778.12	3.86	782.46
3.85	503.66	3.85	717.75	3.85	778.61	3.85	782.40
3.85	508.15	3.85	707.79	3.85	778.58	3.85	782.35
3.84	512.64	3.84	709.19	3.84	778.54	3.84	782.29
3.83	517.13	3.83	713.70	3.83	778.51	3.83	782.24
3.82	521.62	3.82	718.21	3.82	778.48	3.82	782.18
3.82	522.04	3.82	722.72	3.82	777.85	3.82	782.12

3.81	521.72	3.81	727.23	3.81	777.13	3.81	782.07
3.80	521.40	3.80	731.74	3.80	776.41	3.80	782.01
3.79	521.08	3.79	736.25	3.79	775.69	3.79	781.96
3.79	520.76	3.79	740.76	3.79	774.97	3.79	781.91
3.78	520.50	3.78	741.16	3.78	774.61	3.78	781.80
3.77	520.28	3.77	742.24	3.77	774.47	3.77	781.66
3.77	521.19	3.77	743.40	3.77	774.32	3.77	781.51
3.76	522.35	3.76	744.57	3.76	774.17	3.76	781.36
3.75	523.52	3.75	745.74	3.75	774.02	3.75	781.22
3.74	524.68	3.74	746.90	3.74	773.87	3.74	781.07
3.74	525.85	3.74	748.07	3.74	773.71	3.74	780.92
3.73	527.02	3.73	749.23	3.73	773.53	3.73	780.77
3.72	528.18	3.72	750.40	3.72	773.35	3.72	780.63
3.71	528.29	3.71	751.57	3.71	773.17	3.71	780.48
3.71	528.13	3.71	752.73	3.71	772.99	3.71	780.33
3.70	527.97	3.70	753.90	3.70	772.81	3.70	780.19
3.69	527.98	3.69	755.06	3.69	772.63	3.69	780.04
3.68	528.56	3.68	756.22	3.68	772.12	3.68	779.59
3.68	529.14	3.68	760.99	3.68	771.22	3.68	778.45
3.67	531.26	3.67	759.86	3.67	770.31	3.67	777.30
3.66	536.33	3.66	758.59	3.66	769.41	3.66	776.16
3.65	541.40	3.65	757.32	3.65	768.50	3.65	775.01
3.65	546.47	3.65	756.05	3.65	767.59	3.65	773.87
3.64	551.54	3.64	754.78	3.64	766.70	3.64	772.72
3.63	556.61	3.63	753.51	3.63	765.41	3.63	771.58
3.62	561.67	3.62	752.24	3.62	764.14	3.62	770.43
3.62	566.74	3.62	750.98	3.62	762.87	3.62	769.29
3.61	569.42	3.61	749.71	3.61	761.60	3.61	768.14
3.60	569.65	3.60	748.44	3.60	760.33	3.60	766.99
3.60	569.84	3.60	747.77	3.60	759.19	3.60	765.85
3.59	569.56	3.59	747.15	3.59	758.57	3.59	764.58
3.58	569.28	3.58	746.51	3.58	757.93	3.58	763.09
3.57	565.56	3.57	745.87	3.57	757.29	3.57	761.31
3.57	559.98	3.57	745.23	3.57	756.65	3.57	759.52
3.56	554.40	3.56	744.59	3.56	756.01	3.56	757.74
3.55	548.82	3.55	743.95	3.55	755.38	3.55	755.95
3.54	543.24	3.54	743.31	3.54	754.19	3.54	754.17
3.54	537.66	3.54	742.67	3.54	752.65	3.54	752.38
3.53	532.08	3.53	742.03	3.53	751.11	3.53	750.60
3.52	529.05	3.52	741.39	3.52	749.58	3.52	748.81
3.51	529.12	3.51	740.76	3.51	748.04	3.51	747.03

3.51	529.18	3.51	739.88	3.51	746.50	3.51	745.24
3.50	529.24	3.50	737.88	3.50	744.97	3.50	743.46
3.49	529.31	3.49	735.74	3.49	742.96	3.49	741.67
3.48	529.10	3.48	733.60	3.48	740.82	3.48	741.63
3.48	527.48	3.48	731.48	3.48	738.69	3.48	741.91
3.47	524.20	3.47	729.33	3.47	736.55	3.47	742.20
3.46	520.92	3.46	727.18	3.46	734.41	3.46	742.48
3.45	517.64	3.45	725.04	3.45	732.28	3.45	742.76
3.45	514.36	3.45	722.89	3.45	730.14	3.45	743.05
3.44	511.08	3.44	720.75	3.44	727.83	3.44	743.33
3.43	507.80	3.43	718.60	3.43	725.39	3.43	743.62
3.43	504.51	3.43	716.45	3.43	722.95	3.43	743.90
3.42	504.04	3.42	714.33	3.42	720.50	3.42	744.19
3.41	504.56	3.41	710.85	3.41	718.06	3.41	744.47
3.40	504.98	3.40	707.57	3.40	715.62	3.40	744.76
3.40	505.41	3.40	708.03	3.40	713.27	3.40	745.04
3.39	505.83	3.39	706.13	3.39	711.38	3.39	745.80
3.38	506.45	3.38	704.27	3.38	709.52	3.38	747.21
3.37	507.20	3.37	702.41	3.37	707.65	3.37	748.95
3.37	507.95	3.37	700.55	3.37	705.79	3.37	750.70
3.36	508.71	3.36	698.69	3.36	703.93	3.36	752.44
3.35	509.46	3.35	696.83	3.35	702.07	3.35	754.18
3.34	510.22	3.34	694.97	3.34	701.20	3.34	755.93
3.34	510.97	3.34	693.11	3.34	700.75	3.34	757.67
3.33	511.63	3.33	691.25	3.33	700.30	3.33	759.42
3.32	511.47	3.32	689.39	3.32	699.85	3.32	761.16
3.31	511.31	3.31	687.53	3.31	699.40	3.31	762.90
3.31	511.15	3.31	686.29	3.31	698.95	3.31	764.65
3.30	510.16	3.30	685.66	3.30	698.49	3.30	766.39
3.29	508.87	3.29	684.45	3.29	697.58	3.29	768.05
3.28	507.39	3.28	683.24	3.28	696.39	3.28	768.10
3.28	505.91	3.28	682.04	3.28	695.20	3.28	768.41
3.27	504.43	3.27	680.83	3.27	694.01	3.27	768.71
3.26	502.94	3.26	679.62	3.26	692.82	3.26	769.02
3.25	501.46	3.25	678.42	3.25	691.63	3.25	769.32
3.25	499.98	3.25	677.21	3.25	690.46	3.25	769.62
3.24	498.50	3.24	676.00	3.24	689.60	3.24	769.92
3.23	497.74	3.23	674.80	3.23	688.73	3.23	770.22
3.23	496.85	3.23	673.59	3.23	687.86	3.23	770.52
3.22	495.97	3.22	672.39	3.22	687.00	3.22	770.82
3.21	495.08	3.21	671.21	3.21	686.13	3.21	771.13

3.20	494.20	3.20	669.90	3.20	685.26	3.20	771.43
3.20	493.42	3.20	667.89	3.20	684.19	3.20	771.73
3.19	492.82	3.19	665.32	3.19	682.03	3.19	771.47
3.18	492.23	3.18	659.42	3.18	679.86	3.18	770.16
3.17	491.63	3.17	650.06	3.17	677.70	3.17	768.86
3.17	491.03	3.17	640.71	3.17	675.53	3.17	767.56
3.16	490.43	3.16	631.35	3.16	673.37	3.16	766.25
3.15	480.77	3.15	621.99	3.15	671.20	3.15	764.95
3.14	471.42	3.14	612.64	3.14	669.00	3.14	763.65
3.14	462.06	3.14	603.28	3.14	666.83	3.14	762.35
3.13	452.71	3.13	593.93	3.13	664.64	3.13	761.04
3.12	443.35	3.12	584.57	3.12	661.26	3.12	759.74
3.11	433.99	3.11	575.21	3.11	657.84	3.11	758.44
3.11	427.31	3.11	572.87	3.11	654.41	3.11	757.13
3.10	438.27	3.10	583.83	3.10	649.59	3.10	755.83
3.09	449.22	3.09	594.78	3.09	644.48	3.09	754.28
3.08	460.18	3.08	605.74	3.08	639.50	3.08	753.22
3.08	471.13	3.08	616.69	3.08	634.52	3.08	751.90
3.07	474.97	3.07	620.16	3.07	632.16	3.07	750.58
3.06	476.51	3.06	616.02	3.06	632.82	3.06	749.26
3.06	476.95	3.06	611.14	3.06	633.48	3.06	747.94
3.05	477.38	3.05	611.81	3.05	634.15	3.05	746.62
3.04	475.44	3.04	613.25	3.04	634.81	3.04	745.30
3.03	470.78	3.03	614.90	3.03	635.48	3.03	743.98
3.03	466.13	3.03	616.55	3.03	636.14	3.03	742.66
3.02	461.48	3.02	618.20	3.02	636.89	3.02	741.34
3.01	456.82	3.01	619.85	3.01	638.54	3.01	740.02
3.00	452.17	3.00	621.50	3.00	640.09	3.00	738.71
3.00	447.51	3.00	623.04	3.00	641.58	3.00	737.39

7.7 Datos de temperatura simulación con cinco fuentes de calor

Punto 1 at /LINE:Punto 1		Punto 2 at /LINE:Punto 2		Punto 3 at /LINE:Punto 3		Punto 7 at /LINE:Punto 7	
Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]	Y [m]	Temperature [C]
4.00	549.09	4.00	759.05	4.00	775.13	3.96	793.27
3.99	549.01	3.99	759.83	3.99	775.74	3.95	793.25
3.99	549.05	3.99	760.83	3.99	775.65	3.95	793.23
3.98	550.32	3.98	761.59	3.98	775.55	3.94	793.20
3.97	551.58	3.97	761.43	3.97	775.46	3.93	793.18

3.97	552.85	3.97	761.28	3.97	775.37	3.93	793.16
3.96	554.11	3.96	761.12	3.96	775.27	3.92	793.14
3.95	555.38	3.95	760.96	3.95	775.18	3.91	793.12
3.94	556.65	3.94	760.81	3.94	775.16	3.90	793.10
3.94	557.91	3.94	760.65	3.94	775.40	3.90	793.08
3.93	558.38	3.93	760.50	3.93	775.65	3.89	793.06
3.92	557.81	3.92	760.34	3.92	775.89	3.88	793.05
3.91	557.23	3.91	760.18	3.91	776.14	3.87	793.05
3.91	556.66	3.91	760.26	3.91	776.38	3.87	793.04
3.90	556.08	3.90	761.05	3.90	776.66	3.86	793.03
3.89	554.85	3.89	761.60	3.89	777.26	3.85	793.03
3.88	546.89	3.88	755.42	3.88	778.27	3.84	793.02
3.88	538.23	3.88	746.76	3.88	779.28	3.84	793.01
3.87	529.53	3.87	738.10	3.87	780.29	3.83	793.00
3.86	522.21	3.86	729.44	3.86	781.30	3.82	793.00
3.85	519.80	3.85	720.77	3.85	782.00	3.82	792.99
3.85	524.20	3.85	712.11	3.85	782.02	3.81	792.98
3.84	528.60	3.84	713.73	3.84	782.04	3.80	792.98
3.83	533.00	3.83	718.16	3.83	782.06	3.79	792.97
3.82	537.40	3.82	722.58	3.82	782.08	3.79	792.98
3.82	538.22	3.82	727.00	3.82	781.70	3.78	793.00
3.81	538.39	3.81	731.43	3.81	781.25	3.77	793.02
3.80	538.56	3.80	735.85	3.80	780.81	3.76	793.04
3.79	538.73	3.79	740.27	3.79	780.36	3.76	793.06
3.79	538.89	3.79	744.70	3.79	779.91	3.75	793.08
3.78	539.17	3.78	745.70	3.78	779.78	3.74	793.10
3.77	539.53	3.77	747.19	3.77	779.80	3.74	793.12
3.77	540.85	3.77	748.73	3.77	779.83	3.73	793.14
3.76	542.38	3.76	750.27	3.76	779.86	3.72	793.16
3.75	543.92	3.75	751.80	3.75	779.88	3.71	793.18
3.74	545.45	3.74	753.34	3.74	779.91	3.71	793.20
3.74	546.99	3.74	754.87	3.74	780.06	3.70	793.22
3.73	548.53	3.73	756.41	3.73	780.33	3.69	793.24
3.72	550.06	3.72	757.95	3.72	780.60	3.68	793.00
3.71	550.49	3.71	759.48	3.71	780.87	3.68	792.40
3.71	550.64	3.71	761.02	3.71	781.14	3.67	791.80
3.70	550.80	3.70	762.55	3.70	781.41	3.66	791.20
3.69	550.88	3.69	764.09	3.69	781.68	3.65	790.60
3.68	550.74	3.68	765.57	3.68	781.83	3.65	790.00
3.68	550.60	3.68	770.10	3.68	781.84	3.64	789.40
3.67	552.15	3.67	769.21	3.67	781.84	3.63	788.80

3.66	556.94	3.66	768.12	3.66	781.85	3.63	788.20
3.65	561.73	3.65	767.04	3.65	781.85	3.62	787.60
3.65	566.52	3.65	765.95	3.65	781.86	3.61	787.00
3.64	571.31	3.64	764.86	3.64	781.86	3.60	786.40
3.63	576.10	3.63	763.77	3.63	780.75	3.60	785.80
3.62	580.89	3.62	762.69	3.62	779.66	3.59	784.77
3.62	585.68	3.62	761.60	3.62	778.58	3.58	782.15
3.61	588.19	3.61	760.51	3.61	777.49	3.57	779.00
3.60	588.36	3.60	759.42	3.60	776.40	3.57	775.84
3.60	588.50	3.60	759.59	3.60	775.59	3.56	772.68
3.59	588.21	3.59	759.87	3.59	775.86	3.55	769.53
3.58	587.92	3.58	760.15	3.58	776.15	3.54	766.37
3.57	585.03	3.57	760.44	3.57	776.44	3.54	763.22
3.57	580.74	3.57	760.73	3.57	776.72	3.53	760.06
3.56	576.45	3.56	761.02	3.56	777.01	3.52	756.90
3.55	572.15	3.55	761.30	3.55	777.30	3.52	753.75
3.54	567.86	3.54	761.59	3.54	777.20	3.51	750.59
3.54	563.56	3.54	761.88	3.54	776.88	3.50	747.43
3.53	559.27	3.53	762.17	3.53	776.56	3.49	744.28
3.52	556.75	3.52	762.45	3.52	776.24	3.49	742.19
3.51	556.39	3.51	762.74	3.51	775.92	3.48	742.30
3.51	556.04	3.51	762.86	3.51	775.60	3.47	742.47
3.50	555.68	3.50	761.02	3.50	775.28	3.46	742.63
3.49	555.32	3.49	758.74	3.49	773.43	3.46	742.80
3.48	554.37	3.48	756.46	3.48	771.15	3.45	742.97
3.48	551.31	3.48	754.19	3.48	768.87	3.44	743.13
3.47	547.98	3.47	751.89	3.47	766.59	3.43	743.30
3.46	544.66	3.46	749.61	3.46	764.30	3.43	743.47
3.45	541.34	3.45	747.33	3.45	762.02	3.42	743.63
3.45	538.02	3.45	745.05	3.45	759.74	3.41	743.80
3.44	534.70	3.44	742.77	3.44	757.58	3.41	743.97
3.43	531.37	3.43	740.48	3.43	755.51	3.40	744.13
3.43	528.05	3.43	738.20	3.43	753.45	3.39	744.74
3.42	528.28	3.42	735.95	3.42	751.38	3.38	747.57
3.41	528.32	3.41	732.40	3.41	749.32	3.38	750.57
3.40	528.42	3.40	729.05	3.40	747.25	3.37	753.57
3.40	528.52	3.40	727.58	3.40	745.07	3.36	756.57
3.39	528.63	3.39	724.01	3.39	741.56	3.35	759.57
3.38	528.00	3.38	720.55	3.38	738.11	3.35	762.57
3.37	526.88	3.37	717.10	3.37	734.65	3.34	765.57
3.37	525.76	3.37	713.64	3.37	731.19	3.33	768.56

3.36	524.63	3.36	710.19	3.36	727.73	3.32	771.56
3.35	523.51	3.35	706.73	3.35	724.27	3.32	774.56
3.34	522.38	3.34	703.28	3.34	722.21	3.31	777.56
3.34	521.26	3.34	699.82	3.34	720.76	3.30	780.56
3.33	520.25	3.33	696.37	3.33	719.30	3.30	783.56
3.32	520.27	3.32	692.91	3.32	717.84	3.29	785.36
3.31	520.29	3.31	689.46	3.31	716.39	3.28	785.93
3.31	520.31	3.31	687.10	3.31	714.93	3.27	786.38
3.30	518.86	3.30	686.86	3.30	713.54	3.27	786.84
3.29	520.51	3.29	689.57	3.29	714.75	3.26	787.29
3.28	523.00	3.28	692.28	3.28	717.43	3.25	787.74
3.28	525.48	3.28	694.99	3.28	720.12	3.24	788.19
3.27	527.97	3.27	697.70	3.27	722.80	3.24	788.64
3.26	530.46	3.26	700.42	3.26	725.48	3.23	789.10
3.25	532.95	3.25	703.13	3.25	728.16	3.22	789.55
3.25	535.43	3.25	705.84	3.25	730.84	3.22	790.00
3.24	537.92	3.24	708.55	3.24	733.51	3.21	790.45
3.23	539.85	3.23	711.26	3.23	736.18	3.20	790.90
3.23	540.45	3.23	713.97	3.23	738.85	3.19	791.37
3.22	541.05	3.22	716.61	3.22	741.52	3.19	791.39
3.21	541.65	3.21	719.35	3.21	744.19	3.18	791.38
3.20	542.25	3.20	722.32	3.20	746.86	3.17	791.37
3.20	542.39	3.20	725.98	3.20	749.66	3.16	791.36
3.19	542.37	3.19	729.61	3.19	753.84	3.16	791.35
3.18	542.34	3.18	729.24	3.18	757.91	3.15	791.34
3.17	542.31	3.17	724.71	3.17	761.97	3.14	791.33
3.17	542.29	3.17	720.19	3.17	766.04	3.13	791.32
3.16	542.25	3.16	715.67	3.16	770.11	3.13	791.31
3.15	537.58	3.15	711.14	3.15	774.18	3.12	791.31
3.14	533.06	3.14	706.62	3.14	778.26	3.11	791.30
3.14	528.54	3.14	702.09	3.14	782.19	3.11	791.29
3.13	524.01	3.13	697.57	3.13	786.16	3.10	791.28
3.12	519.49	3.12	693.04	3.12	787.33	3.09	791.26
3.11	514.96	3.11	688.52	3.11	788.40	3.08	791.19
3.11	513.37	3.11	691.67	3.11	789.46	3.08	791.11
3.10	531.07	3.10	709.38	3.10	787.52	3.07	791.04
3.09	548.78	3.09	727.08	3.09	785.07	3.06	790.96
3.08	566.48	3.08	744.79	3.08	782.69	3.05	790.88
3.08	584.19	3.08	762.49	3.08	780.31	3.05	790.80
3.07	590.93	3.07	771.31	3.07	779.02	3.04	790.73
3.06	593.68	3.06	769.88	3.06	778.98	3.03	790.65

3.06	592.98	3.06	767.55	3.06	778.94	3.02	790.57
3.05	592.27	3.05	767.51	3.05	778.91	3.02	790.49
3.04	587.85	3.04	767.51	3.04	778.87	3.01	790.42
3.03	579.21	3.03	767.53	3.03	778.83	3.00	790.34
3.03	570.57	3.03	767.55	3.03	778.79	3.00	790.26
3.02	561.94	3.02	767.56	3.02	778.75	2.99	790.19
3.01	553.30	3.01	767.58	3.01	778.77	2.98	790.15
3.00	544.66	3.00	767.60	3.00	778.79	2.97	790.12
3.00	536.03	3.00	767.63	3.00	778.80	2.97	790.08

8. Abreviaturas y siglas

Abreviaturas	Significado
A	Acumulación
a	Área
\bar{P}	Cantidad de movimiento
c_p	Capacidad térmica
k	Constante de conductividad térmica
R	Constante universal de los gases ideales
ρ	Densidad
(∇)	Divergencia
e	Energía
q	Energía calorífica por conducción
\hat{U}	Energía interna
\hat{H}	Entalpia
E	Entrada
\dot{G}	Generación de energía a causas de reacciones externas
G	Generada
C°	Grados Celcius
g	Gravedad
m	Masa
m^3	Metro cúbico
n	Número de moles
P	Presión
S	Salida
τ	Tensor
t	Tiempo
W	Vatios
v	Velocidad
μ	Viscosidad
V	Volumen

Sigla	Significado
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
NIST	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología