



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS:**

**ANÁLISIS DEL MEZCLADO TÉRMICO EN OLLAS AGITADAS CON GAS  
CON INYECCIÓN CÉNTRICA Y EXCÉNTRICA MEDIANTE MODELADO  
FÍSICO Y MATEMÁTICO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**Marco Antonio Guevara Castillo**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: CARLOS GONZÁLEZ RIVERA**  
**VOCAL: MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**  
**SECRETARIO: JOSÉ ALFREDO DELGADO ÁLVAREZ**  
**1<sup>er</sup>. SUPLENTE: DIEGO ENRIQUE GONZÁLEZ GONZÁLEZ**  
**2° SUPLENTE: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO 203, 1ER PISO, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA**

**ASESOR DEL TEMA: DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**

\_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO: DR. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA**

\_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE: MARCO ANTONIO GUEVARA CASTILLO**

\_\_\_\_\_

## **Agradecimientos**

Al proyecto DGAPA - PAPIIT clave IN115619, "Determinación de tiempo de mezclado en ollas agitadas con gas mediante modelado matemático y físico con PLIF", responsable técnico Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
1.1	Panorama general	6
1.2	Proceso de fabricación del acero	7
1.2.1	Refinación primaria o aceración	8
1.2.1.1	Vía integrada Alto Horno-BOF	8
1.2.1.2	Vía integrada reducción directa-horno de arco eléctrico	8
1.2.1.3	Ruta no integrada	9
1.2.2	Refinación secundaria	9
1.2.2.1	Horno Olla (Ladle Furnace)	10
1.3	Modelado físico del Horno Olla	12
1.3.1	Dinámica de fluidos	14
1.3.2	Conservación de energía	15
1.3.2.1	Fluorescencia Inducida por Láser en un Plano (PLIF)	16
1.3.3	Mezclado	16
1.4	Revisión bibliográfica del modelado físico del Horno Olla	17
1.5	Modelado matemático del Horno Olla	18
1.5.1	Modelos multifásicos	20
1.5.2	Interacciones interfaciales	20
1.5.3	Revisión bibliográfica del modelado matemático del Horno Olla	22
1.6	<b>Hipótesis</b>	<b>24</b>
1.7	<b>Objetivo General</b>	<b>25</b>
1.7.1	Objetivos Particulares	25
<b>2</b>	<b>Metodología</b>	<b>26</b>
2.1	Modelado físico	26
2.1.1	Similitud geométrica	26
2.1.2	Similitud dinámica	27
2.1.3	Similitud cinemática	29
2.1.4	Similitud térmica	30
2.1.5	Propiedades físicas	31
2.2	Experimentación	32
2.3	Arreglo experimental	35
2.4	Metodología para uso de PLIF	37
2.4.1	Método experimental	37
2.4.2	Tratamiento de imágenes	37
2.4.3	Calibración	37
2.4.4	Procedimiento para el uso de la técnica PLIF en el mezclado térmico y procesamiento de imágenes.	39
2.4.5	Implementación de termopares para la validación de la técnica de PLIF térmico y modelado matemático	40
2.5	Modelado matemático	40
2.5.1	Suposiciones	40
2.5.2	Ecuaciones gobernantes	41
2.5.3	Condiciones de frontera	47
2.5.4	Solución numérica ANSYS-FLUENT®	48
2.5.4.1	Dinámica de fluidos	49
2.5.4.2	Conservación de energía	50

<b>3</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>50</b>
	3.1 Descripción de resultados	51
	3.1.1 Dinámica de fluidos	51
	3.1.1.1 Validación de resultados obtenidos del modelo matemático con los obtenidos mediante PIV	51
	3.1.1.2 Inyección céntrica en el Plano 2	53
	3.1.1.3 Inyección céntrica en el Plano 3	55
	3.1.1.4 Inyección excéntrica en el Plano 1	58
	3.1.1.5 Inyección excéntrica en el Plano 2	61
	3.1.2 Resultados de conservación de energía	59
	3.1.2.1 Resultados PLIF Térmico	59
	3.1.2.1.1 Inyección céntrica	63
	3.1.2.1.2 Inyección excéntrica	64
	3.1.2.2 Resultados modelo matemático	65
	3.1.2.2.1 Inyección axisimétrica	65
	3.1.2.2.2 Inyección excéntrica	66
	3.1.3 Comparación de la evolución térmica entre modelo físico y numérico	67
	3.1.3.1 Inyección axisimétrica	67
	3.1.3.2 Inyección excéntrica	72
	3.1.4 Resultados de la validación del modelo matemático con termopares	68
	3.1.4.1 Inyección céntrica	77
	3.1.4.2 Inyección excéntrica	78
	3.1.5 Pérdidas de energía	80
	3.2 Discusión de Resultados	81
	3.2.1 Dinámica de fluidos	81
	3.2.2 Conservación de energía	83
	3.2.3 Pérdidas de energía	86
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>Apéndices</b>	<b>91</b>
	Anexo A. Cálculo del Flux para el Modelo Matemático	91
	Anexo B. Solución del Modelo Matemático en el software CFD ANSYS FLUENT 19.0	93

## **1 Introducción**

### *1.1 Panorama general*

En la actualidad se han desarrollado nuevos materiales y se han implementado otros que, a pesar de que ya existían no tenían un uso específico, sin embargo, por más que la ciencia e ingeniería de materiales ha tenido un extraordinario avance, existen materiales que son difíciles de sustituir. Uno de estos materiales es el acero, pues se trata de un material de bajo costo y que además posee una alta resistencia mecánica. Debido a que su consumo es en gran cantidad, la demanda se encuentra en continuo crecimiento a nivel mundial. En el año 2019 la producción de acero a nivel mundial fue de 1869 millones de toneladas, 3.4% mayor que en 2018 mientras que al año se producen en promedio 1600 millones de toneladas siendo China y Japón los principales productores a nivel mundial, donde México ocupa el lugar número 15 con una producción de 18.6 millones de toneladas de acero líquido de acuerdo a la CANACERO (Cámara Nacional del Acero) [1]. Aunado a esto, la industria siderúrgica representa el 2.1% del PIB total y el 7.1% del PIB industrial. Por esta razón es imprescindible la fabricación de un acero de alta calidad metalúrgica. Para lograr este objetivo el acero debe pasar por un proceso de refinación en el cual se remueven las impurezas mediante procesos como son: desulfuración, remoción de inclusiones y la desoxidación. Estos procesos requieren de un correcto mezclado térmico y químico para el aseguramiento de la calidad. Este mezclado se logra mediante el uso de la inyección de gas Argón por el fondo, en el cual, por medio de burbujas se homogeniza la mezcla del metal líquido mientras que las impurezas son transportadas a la capa de escoria en la zona superior del baño. Este proceso se lleva a cabo en el denominado "Horno Olla". Si bien el proceso ha sido utilizado por muchos años, debido a la complejidad de su estudio, se ha tenido un avance lento en la generación de conocimiento para la optimización del mismo y así disminuir el impacto ambiental que éste ocasiona, mejorar la calidad del acero y aumentar la productividad de las acerías. En años recientes, y tomando en cuenta lo difícil, complejo y peligroso que resulta la experimentación directa en acero líquido a 1600°C, mediante el avance científico y tecnológico de la ingeniería de procesos metalúrgicos se ha logrado desarrollar el escalamiento de los prototipos industriales a modelos físicos, además de que mediante el uso de criterios de similitud se ha logrado sustituir el acero por agua con lo que el estudio de los fenómenos dentro del horno se facilita enormemente. También la herramienta de modelado matemático se ha hecho popular para el estudio de este reactor. Particularmente muy poco trabajo se ha hecho en relación a la operación del

mezclado térmico por parte de los grupos de investigación a nivel global. Dicho lo anterior, el presente trabajo hizo uso de un modelo de agua a escala 1/17 de un prototipo industrial de 200 toneladas aplicando la técnica PLIF térmico y la instrumentación del modelo con termopares tipo K para medir el mezclado térmico en ollas agitadas con gas. Junto con el desarrollo de los modelos físicos se ha implementado modelado matemático mediante la aplicación de software CFD para predecir el mezclado térmico, con lo que se disminuye abismalmente el uso de recursos obteniéndose resultados igual de buenos como los obtenidos por los modelos físicos. Por tanto, además del modelado físico se realizó un modelo matemático con el uso del software ANSYS FLUENT® para evaluar el mezclado térmico en ollas agitadas con gas de manera céntrica y excéntrica.

### 1.2 Proceso de fabricación del acero

El proceso de fabricación del acero consiste de forma general en producir el acero a partir de mineral de hierro o bien de chatarra mediante 4 pasos: fabricación de hierro, refinación primaria, refinación secundaria y fundición de acero. Los principales procesos para la fabricación de acero son 2, por la vía integrada y por la vía no integrada, estos se ilustran de manera general en la Figura 1.1 Difieren tanto en la materia prima como en el tipo de horno utilizado.

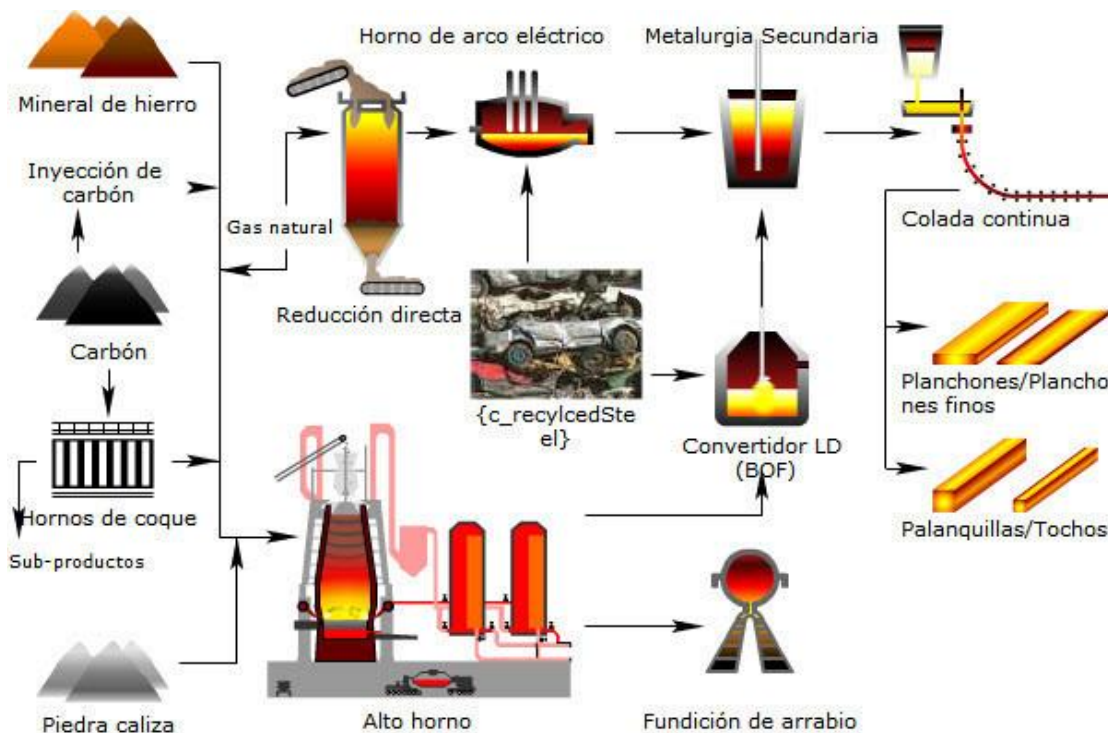


Figura 1.1 Producción de acero: desde el mineral hasta el producto semiterminado. Adaptada de [2].



## 1.2.1 Refinación primaria o aceración

### 1.2.1.1 Vía integrada Alto Horno-BOF

En este proceso se utiliza el alto horno. La Figura 1.2 muestra diagrama del proceso. Se trata de un proceso de reducción donde las materias primas son minerales de hierro (principalmente hematita), piedra caliza y coque. En este proceso el mineral recibe un pre-tratamiento de pelletización el cual consiste en moler el mineral, concentrarlo, agregar aglutinante y obtener ya sea semiesferas denominadas “pellets” o bien, sinter dependiendo del tamaño de malla del mineral molido, los cuales se someten a un proceso de tostación antes de ser enviados al alto horno. Una vez que esta materia prima se reduce en el alto horno forma lo que se conoce como arrabio o “pig iron” que es un hierro metálico que tiene un alto contenido de carbono. Este arrabio es transportado hacia un convertidor de oxígeno (BOF: Basic Oxygen Furnace) mediante el uso de carros torpedero. Una vez el arrabio se encuentra dentro del BOF se reduce el contenido de carbono a través de una lanza que inyecta oxígeno formando principalmente  $\text{CO}_2$ . Después de esta disminución del contenido de carbono el metal líquido se transporta al denominado horno olla para continuar con el proceso de refinación secundaria.



Figura 1.2 Esquema de fabricación de hierro y siderurgia primaria por medio de la vía integrada Alto Horno-BOF. Obtenida de [3].

### 1.2.1.2 Vía integrada reducción directa-horno de arco eléctrico

Este proceso se muestra en la Figura 1.3, donde el mismo mineral pelletizado o en forma de sinter se reduce en hornos de reducción directa, cuyo producto es el hierro esponja sólido, el cual a su vez se funde generalmente con algo de chatarra en el denominado

Horno de Arco Eléctrico EAF, por sus siglas en inglés (Electric Arc Furnace). Luego entonces, a través la generación de un arco eléctrico generado en los electrodos de grafito se funde una mezcla de hierro esponja y chatarra de acero. Una vez que se obtiene el acero líquido es enviado al proceso de refinación secundaria (Horno Olla).

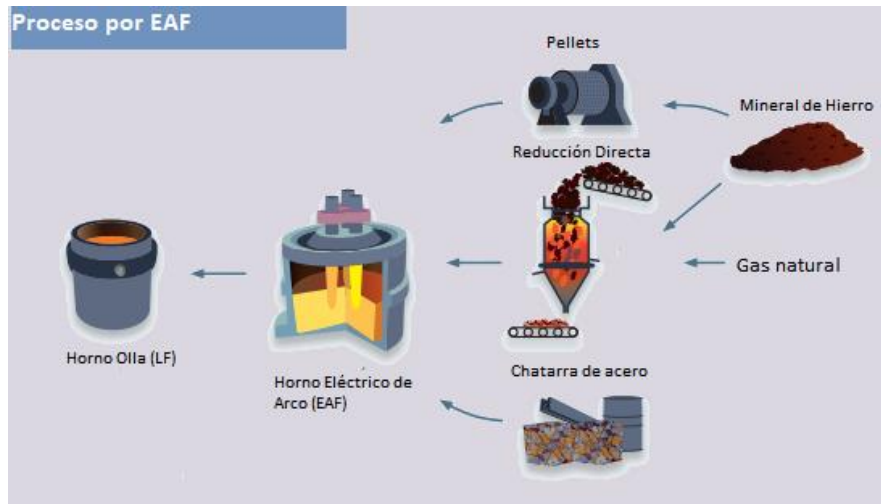


Figura 1.3 Esquema de fabricación de acero por medio de la ruta integrada reducción Directa - Horno de Arco Eléctrico. Obtenida de [3].

### 1.2.1.3 Ruta no integrada

Además de las 2 rutas integradas descritas en las secciones anteriores, en donde el mineral se reduce (a lo que se le denomina en inglés Ironmaking) y luego se produce acero (a lo que en inglés se le llama steelmaking), existe una ruta no integrada. En esta ruta se suprime la producción del mineral y el ironmaking, siendo la materia prima 100% de chatarra de acero que se funde en Hornos de arco eléctrico.

### 1.2.2 Refinación secundaria

Una vez que se obtuvo la aceración del acero, la siguiente etapa en su producción es la refinación de éste en estado líquido, para ello se emplea el denominado Horno Olla. A este proceso también se le conoce como refinación secundaria, y que es necesaria realizar para asegurar la calidad metalúrgica del acero antes de solidificarlo en máquinas de colada continua. Esta refinación es de suma importancia en la calidad final del acero como producto y tiene como objetivos: desoxidar, desulfurar, ajustar la composición química, controlar la cantidad y forma de las inclusiones no metálicas y homogenizar la mezcla tanto química como térmicamente al acero. Lo anterior se logra a través de la inyección de un gas inerte (Ar) por medio de un tapón poroso.

### 1.2.2.1 Horno Olla (*Ladle Furnace*)

El Horno Olla es fabricado con forma cilíndrica como se aprecia en la Figura 1.4. En la parte interna se encuentra recubierto por ladrillo refractario y en la parte externa contiene una carcasa de metal. En la parte inferior se ubica un tapón poroso por dónde se realiza la inyección del gas Argón. Cuenta con una tolva por donde se adicionan las ferroaleaciones y un sistema de inyección de polvo para los procesos que lo requieran. Además, cuenta con 3 electrodos de grafito ubicados en la parte superior los cuales tienen como objetivo generar arcos eléctricos para mantener la temperatura del baño. Se debe poner especial atención a estos arcos, ya que durante el desarrollo de este trabajo se hará el escalamiento de uno de ellos. Durante el proceso de refinación se crea una capa de escoria en la parte superior del baño la cual lo protege de la oxidación y también actúa para atrapar a las inclusiones no metálicas flotadas por la agitación. La agitación del horno olla se puede practicar de dos maneras distintas:

- 1) Mediante el uso de inyección de gases inertes a través de tapones porosos colocados en el fondo de la olla o a través de lanzas sumergidas en el acero.
- 2) Mediante la aplicación de campos electromagnéticos que generan fuerzas electromagnéticas para agitar el acero.

De los anteriores, la inyección de gases por el fondo es sin duda, el método más ampliamente utilizado en todo el mundo para agitar acero líquido.

Las operaciones a seguir en el proceso del horno olla son las siguientes (ver Figura 1.5):

- a) **Desoxidación:** durante el proceso de fabricación del acero el metal líquido disuelve una porción de  $O_2$  la cual tiene un impacto directo en la calidad del acero debido a que en el estado líquido este puede formar inclusiones no metálicas (óxidos) con el hierro y distintos solutos, que son dañinas para las propiedades mecánicas del acero. El control de dicho elemento se lleva a cabo con la adición de polvo de aluminio que forma óxidos en forma de precipitados los cuales son flotados por la inyección de Argón hacia la escoria.
- b) **Desulfuración:** el azufre (S) se considera como la principal impureza que daña a la calidad metalúrgica del acero ya que lo fragiliza durante la laminación en caliente por la formación de FeS o de MnS, Para su control se requiere una buena agitación y la adición de Ca y/o Al en polvo, los cuales promueven la formación de sulfuros que son flotados a la capa de escoria, la cual además debe poseer capacidad para

absorberla, lo que generalmente se logra en condiciones reductoras y conteniendo  $\text{CaC}_2$ .

- c) **Ajuste de composición química:** se realiza a través de la adición de aleantes en forma de elementos puros o bien de ferroaleaciones (Fe-Si, Fe-Mn, etc). Estas pueden ser añadidas al baño de dos formas: en forma de polvo a través de la inyección de polvo o bien directamente al metal líquido trituradas. El propósito de este ajuste es cumplir con la norma de composición química del grado de acero que se está fabricando en una colada dada.
- d) **Control de inclusiones:** las inclusiones no metálicas provenientes de precipitaciones (endógenas) y desgaste del refractario (exógenas) son consideradas dañinas junto con las que se forman por la presencia de S u  $\text{O}_2$  ya que disminuyen las propiedades mecánicas del acero. Para controlar su forma y cantidad se agrega Ca-Si en polvo el cual tiene como función promover inclusiones de forma globular con propiedades deseables, mientras que el burbujeo de gas ayuda a flotar las inclusiones pequeñas hacia la escoria promoviendo la limpieza del acero.
- e) **Desgasificación:** es el último paso en la refinación secundaria, dependiendo del grado del acero y su calidad requerida. Se realiza al vacío o inyectando Argón en distintos procesos, tiene como objetivo disminuir la cantidad de gases presentes en el baño como son  $\text{H}_2$  y  $\text{N}_2$  o elementos como C y así evitar la formación de hidruros, nitruros o carburos para ciertas aplicaciones. Esta desgasificación ya no se hace en la Olla sino en otro tipo de reactor como el AOD o el RH.

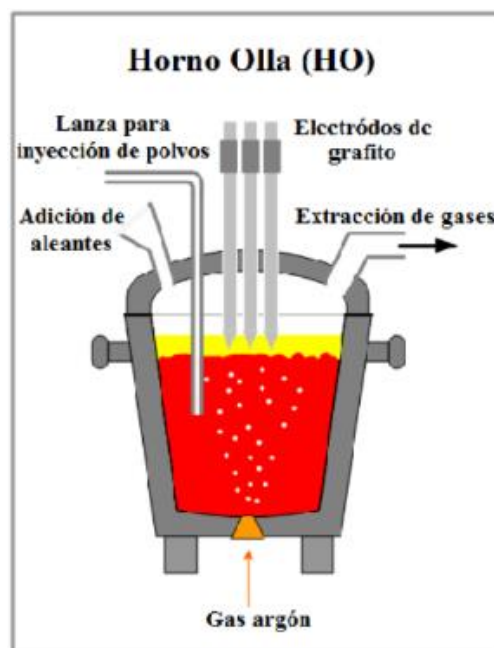


Figura 1.4 Esquema del Horno Olla, utilizado para la refinación secundaria. Tomada de [4].

La eficiencia de este proceso de refinación secundaria depende de una gran cantidad de variables tales como:

El flujo de gas, la posición del tapón poroso, la geometría y el tamaño de la olla y el comportamiento hidrodinámico de las fases líquido-gas-escoria.

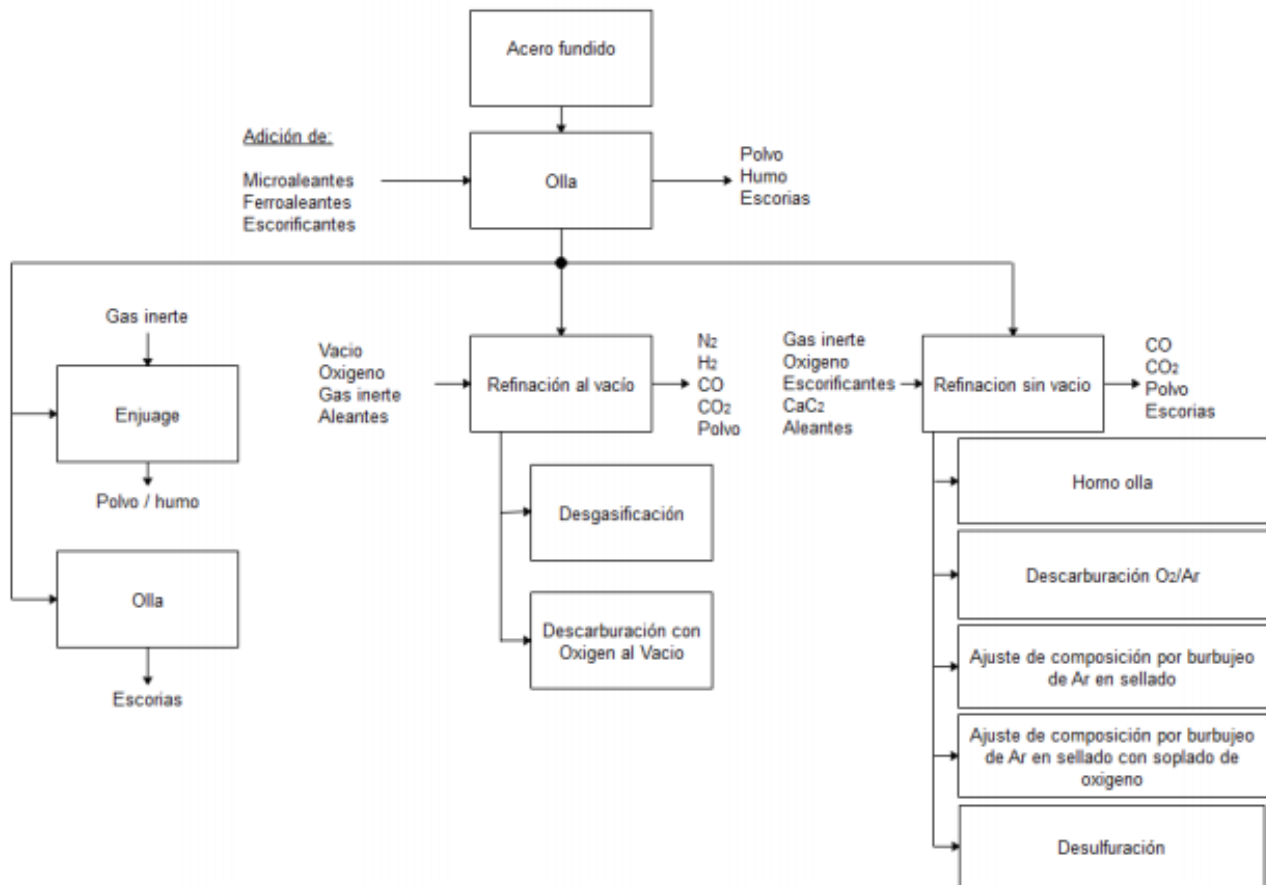


Figura 1.5 Resumen de los procesos realizados en el Horno Olla. Adaptada de [5].

### 1.3 Modelado físico del Horno Olla

Debido a las altas temperaturas, la opacidad visual del acero líquido y el gran tamaño del Horno Olla industrial, se dificulta realizar mediciones y observaciones experimentales in-situ. Por esta razón, a lo largo de las últimas décadas se han realizado estudios de modelos físicos del horno olla usando agua en vez de acero, en donde se han investigado varios aspectos del proceso de este sistema. Tales aspectos son transporte de energía y masa, dinámica de fluidos, así como el mezclado. Para hacer posible el escalamiento del sistema real se hace uso de los denominados “criterios de similitud”, el principal utilizado para sustituir al acero líquido por agua en los estudios radica en que la viscosidad cinemática

del acero líquido a 1600°C es muy cercana a la del agua a 25°C. De esta forma, se han sustituido a los ladrillos de refractario por plástico transparente y al gas Argón por aire. En lugar de utilizar un tapón poroso se emplea una tobera circular. A la zona donde se mezcla el aire y el agua se le conoce como pluma.

Mediante el uso del modelado físico del Horno Olla se ha podido generar conocimiento acerca de la fluido dinámica, el mezclado térmico (Figura 1.6) y del mezclado químico en el Horno Olla. [6] Dicho lo anterior, en este estudio se buscará el mejor modelado físico posible del mezclado térmico que sucede en este horno debido a la agitación del gas.

El mezclado térmico en el Horno Olla casi no se ha estudiado debido a la dificultad que se presenta al obtener datos de campos térmicos en el horno olla mediante modelado físico, por esta razón, con la aplicación de la innovadora técnica PLIF térmico se obtendrá la distribución térmica en un plano proyectado en el modelo físico. Debe destacarse que esta práctica no se ha realizado con anterioridad. De igual forma, para aumentar el realismo del modelo físico se implementó el uso de quemadores con gas butano/propano, los cuales tienen como función simular a los arcos eléctricos generados desde los electrodos colocados en la parte superior del Horno Olla. En este caso la similitud térmica consistió en proveer la energía que proporcione una rampa de calentamiento de **1°C/minuto** que es típica en estos hornos.

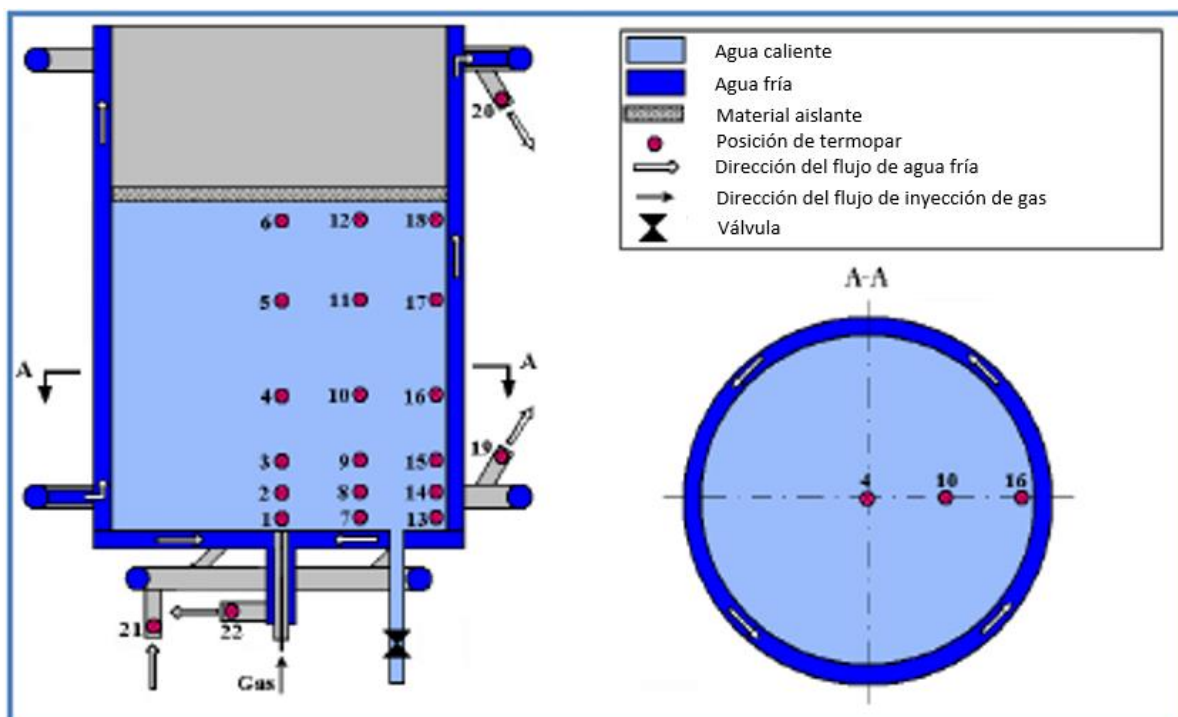


Figura 1.6 Esquema del modelo físico para mezclado térmico con instrumentación de termopares. Adaptada de [6].

### 1.3.1 Dinámica de fluidos

Uno de los principales fenómenos estudiados en el horno olla a través del uso de modelos físicos es la dinámica de fluidos. Esto se realiza con la ayuda de la técnica de PIV (particle image velocity) [7,8] pues permite la obtención de información relacionada con el tiempo de mezclado y el entendimiento de la turbulencia del fluido, patrones de flujo, así como de sus velocidades. Las variables anteriormente mencionadas son dependientes tanto de la posición como del flujo de gas. Además, se han estudiado fenómenos como son la coalescencia y desintegración de burbujas o el diámetro de burbuja. Aunado a esto, gracias al modelado físico también se han podido estudiar variables de la pluma como lo es la fracción de gas, frecuencia de burbujeo y velocidades de ascenso de burbuja por medio de medidores de electro-resistividad. [9] Finalmente, se ha podido comprender el desarrollo de la zona bifásica (líquido-gas) en el Horno Olla. Esta zona se divide en partes como lo muestra la Figura 1.7, las cuales se escriben a continuación:

- 1) **Burbuja primaria:** es la primera zona de formación de la pluma, los parámetros más importantes para estudiar su comportamiento son la energía cinética que proporciona el gas inyectado y el método de inyección.
- 2) **Burbuja libre:** es el punto en donde las burbujas ya alcanzan esferoidicidad y se han formado completamente, sin embargo, su volumen respecto al total de la pluma es despreciable.
- 3) **Pluma:** es la parte de mayor interés y es la que ocupa la mayor proporción de la zona bifásica. Las burbujas al alejarse del punto de inyección cambian su morfología a la de una capucha al realizarse su rompimiento, por tanto, se genera un rango dinámico de tamaños de éstas, experimentando una coalescencia y desintegración continua. Es posible caracterizar completamente la pluma en términos de 2 parámetros: fracción volumen de gas máxima en la línea central de la pluma y el radio donde la fracción volumen de gas es la mitad del presente en la línea central. Brimaconde [9] desarrolló correlaciones empíricas para estas variables.
- 4) **Espuma o “spout”:** es la zona donde el gas se libera, ocupa alrededor del 3% de la longitud de la zona bifásica.

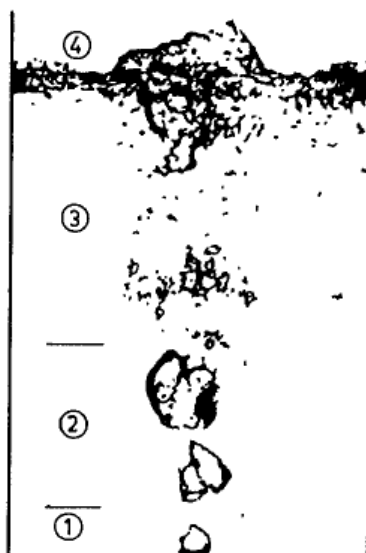


Figura 1.7 Partes de la zona bifásica conocida como pluma. Obtenida de [9].

### 1.3.2 Conservación de energía

Otro aspecto importante de la agitación con gas es que se elimina la estratificación térmica en el baño por lo que se homogeniza la temperatura del baño de acero. A la diferencia de temperaturas en dirección vertical del fondo hacia la parte superior del horno se le llama estratificación térmica. Esta estratificación térmica se forma por la convección natural que se produce en el acero líquido debido a la pérdida de calor del acero hacia las paredes del refractario de la olla. El proceso de transferencia de calor en el horno olla es el resultado de varios fenómenos de transporte. Estos fenómenos de transporte se producen por la pérdida de calor del acero líquido hacia las paredes del refractario y la pérdida de calor por radiación de la fase escoria hacia el ambiente. Otro fenómeno de transporte de energía ocurre cuando se inyecta gas al acero líquido, debido a que el gas se encuentra a una temperatura menor que el metal líquido lo cual produce un gradiente de temperaturas de la fase líquida a la fase gas. Además, existe una fuente de energía que se añade al Horno Olla por medio de arcos generados por los electrodos de grafito. Esta fuente de energía se utiliza para recalentar al acero y mantenerlo en fase líquida durante la refinación. El objetivo del mezclado térmico es mantener al acero a una temperatura homogénea y con un valor que sea adecuado para poder ser colado en una máquina de colada continua, la cual opera con una ventana de operación muy estrecha, por lo que es importante controlar la uniformidad térmica y el valor de la temperatura.



### 1.3.2.1 Fluorescencia Inducida por Láser en un Plano (PLIF)

Por sus siglas en inglés, la técnica PLIF térmico (Planar Laser-Induced Fluorescence) consiste de una técnica óptica de medición instantánea de magnitudes escalares en un plano determinado tal como concentración y temperatura, tiene como ventaja no ser una técnica intrusiva por lo que se evita la distorsión de flujos en el fluido por la presencia de un electrodo o un termopar. Esta técnica consiste en hacer incidir un haz de luz de determinada longitud de onda sobre un plano del fluido bajo estudio, el cual contiene una concentración de una sustancia trazadora definida, la cual absorbe parte de la luz recibida para así ser llevada a un estado de energía electrónica mayor y de esta forma re-emitir espontáneamente el excedente de energía en forma de luz. En cuanto a la técnica de PLIF térmico a concentración de trazador constante, la intensidad de la fluorescencia varía dependiendo de la temperatura. Por esta razón se coloca un filtro óptico sobre la lente de la cámara que solo permite el paso de luz fluorescente. La elección del trazador es de suma importancia para una correcta experimentación, por esa razón, esta sustancia debe cumplir con las siguientes características:

- ✓ Ser estable químicamente al estar sometido a la incidencia de láser y temperatura de trabajo.
- ✓ Ser soluble en agua.
- ✓ El espectro de emisión y absorción del compuesto debe estar lo suficientemente separado para evitar la absorción de la luz emitida.
- ✓ Tener buena sensibilidad de fluorescencia frente a la temperatura.

### 1.3.3 Mezclado

Tanto para los fenómenos de transporte de energía como para los de transporte de masa la eficiencia de muchas operaciones de procesos de refinación que se llevan a cabo en Hornos Olla tiene una estrecha relación con el fenómeno de mezclado. Al mezclar se aumenta la rapidez de la reacción química al igual que se eliminan heterogeneidades térmicas y de soluto en la olla. El concepto de tiempo de mezclado ha sido establecido para representar el estado de agitación en la olla por lo que se toma como índice de eficiencia del proceso. El tiempo de mezclado químico se define como el lapso que toma a un trazador añadido en un punto y en un pulso en la olla, en alcanzar un grado de uniformidad en toda lo olla de acuerdo a un criterio cuantitativo (por ejemplo 95% de uniformidad). Usualmente

se busca disminuir el tiempo de mezclado ya que esto conlleva a un menor gasto energético en los procesos industriales, por tanto, uno de los objetivos que se desea alcanzar con el modelado físico es el de ajustar las variables previamente descritas (flujo de gas, posición de la inyección de gas, etc.), como se muestra en la Figura 1.8) para obtener el tiempo de mezclado mínimo. Para medir esta variable se ha utilizado la técnica de LIF [3, 4, 7] en el caso del mezclado químico. En este proyecto se aplicará la técnica de PLIF para estudiar el mezclado térmico.

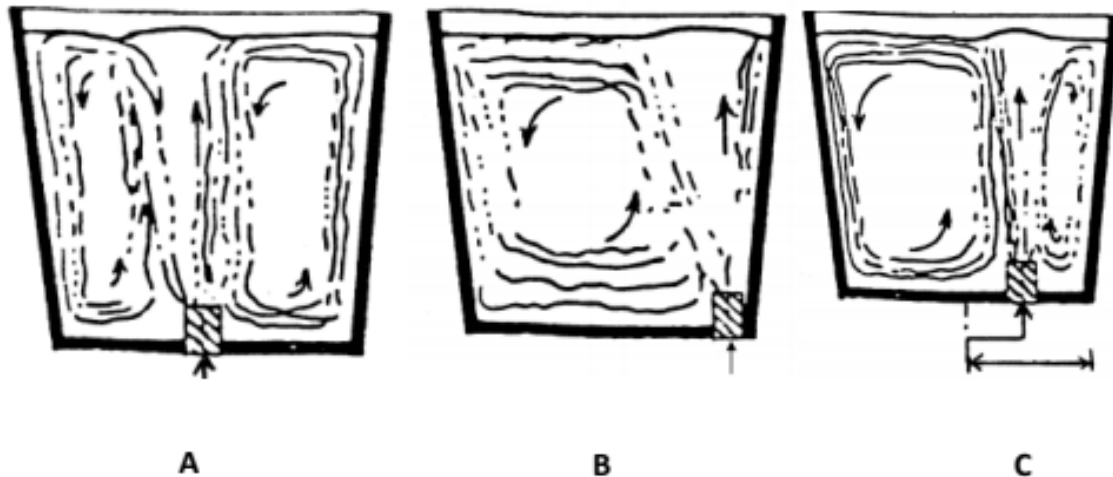


Figura 1.8 Líneas de corriente formadas en distintas localizaciones de la inyección de gas. a) Centro, b)  $1R$ , c)  $R/2$ . Obtenida de [10].

#### 1.4 Revisión bibliográfica del modelado físico del Horno Olla

En cuanto a la dinámica de fluidos Mazumdar y Guthrie [9] presentaron un modelo físico y matemático para el fenómeno de disipación de energía postulando la tasa de disipación de energía. Mietz y Oeters [11] ofrecen uno de los primeros estudios de la influencia de uno y dos tapones a diferentes posiciones radiales en la dinámica de fluidos concluyendo que a una posición de  $0.5R$  tanto para uno como para dos tapones se tiene el menor tiempo de mezclado químico. Se tienen pocos estudios acerca del mezclado térmico en modelos físicos, sin embargo, los siguientes autores presentan algunas contribuciones: He y colaboradores [12] implementaron el uso de modelos híbridos para predecir las temperaturas del acero líquido durante el proceso desde el BOF-Horno, Olla-Colada continua. Ly y colaboradores [13] también hacen uso de modelos híbridos para predecir la temperatura en el Horno Olla, parten de variables de entrada como son el espesor de escoria, longitud del arco y consumo de energía. A pesar de que no trabajaron con un

modelo físico, sino de manera directa en el Horno Olla. Safonov y colaboradores [14], estimaron el efecto que tiene el incremento en el flujo de gas Argón y un incremento en la capa de escoria sobre la velocidad promedio de calentamiento del acero, presentando una disminución. Grip [15] fue uno de los pioneros en experimentar directamente con la olla de mezclado como se muestra en la Figura 1.9, validando contornos de temperatura mediante la comparación de un horno de 7 y de 17 toneladas. Además, V Putan y colaboradores [6] lograron una correcta estratificación térmica del horno olla mediante un modelo físico comprobando que mediante un criterio de similitud térmica como lo es  $\beta\Delta T$  resulta factible hacer el escalamiento térmico de lo que sucede en un horno olla con un modelo de 1/5 parte del tamaño original. Farrera-Buenrostro y colaboradores [16] realizaron un análisis de las pérdidas de calor del acero líquido en el Horno Olla durante la etapa de desulfuración. Turkoglu y Farouk [17] realizaron un análisis numérico de la dinámica de fluidos y el transporte de energía en un modelo a escala del horno olla agitado con gas.

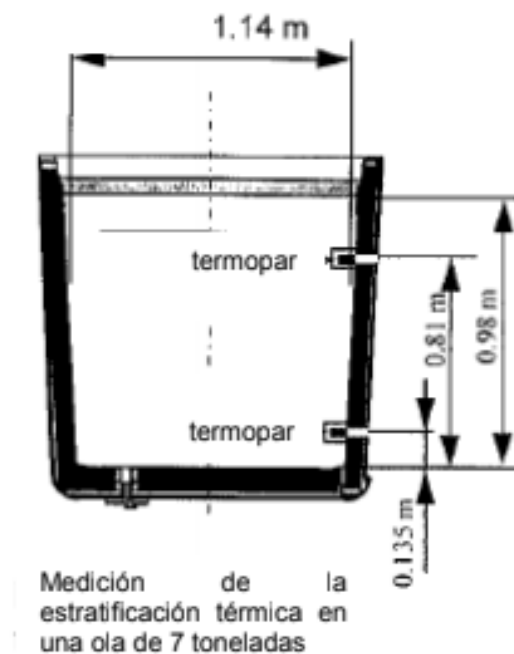


Figura 1.9 Arreglo experimental de Grip para modelar la estratificación térmica del Horno Olla. Obtenida de [15].

### 1.5 Modelado matemático del Horno Olla

Hoy en día el modelado matemático es una poderosa herramienta de la ingeniería de procesos metalúrgicos para la investigación de procesos de alta complejidad, tal es el caso del Horno Olla. Si un modelo matemático es validado, éste puede ser usado para simular

operaciones sin el uso de modelos físicos y sin hacer experimentos en planta. De esta forma, es posible ahorrar una buena cantidad de tiempo y recursos en el proceso de optimizar la refinación secundaria. Sin embargo, aún existe una gran ventana de desarrollo para estos modelos ya que en el caso del Horno Olla se requiere una configuración distinta para cada fenómeno producido dentro del horno. La Figura 1.10 muestra los posibles modelos matemáticos y su aplicación en el horno olla.

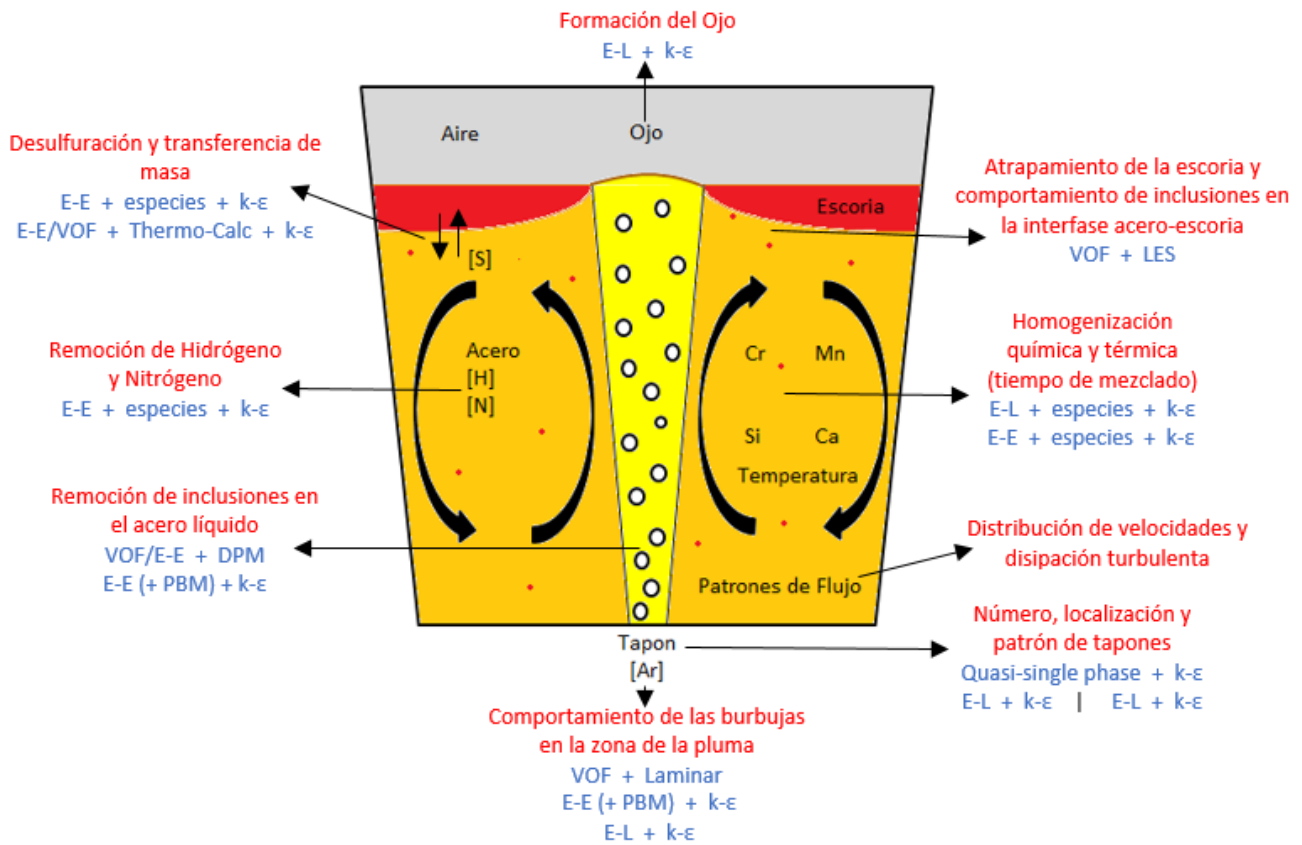


Figura 1.10 Modelos matemáticos y su aplicación en el Horno Olla. Modificada de [18].

Los programas o software CFD (CFD: Computational Fluids Dynamics) tienen como objetivo resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan los fenómenos de continuidad, conservación de momentum, modelos de turbulencia como el k-ε, conservación de masa de especies químicas y conservación de energía. Estas ecuaciones se resuelven mediante el uso de métodos numéricos como son: elemento finito o volumen finito, los cuales se encargan de discretizar el dominio del fenómeno en volúmenes de control. Al validar experimentalmente el modelado matemático con un modelo físico se ha logrado conseguir modelos que describen de mejor manera dichos fenómenos acercándose más a la realidad. La representación del sistema multifásico de flujo de fluidos que se da en una olla agitada con gas se puede describir con varias formulaciones multifásicas y la elección de esta

aproximación es de gran importancia, debido a que describe el comportamiento de cada fase y las interacciones físicas entre ellas.

### 1.5.1 Modelos multifásicos

El modelado hidrodinámico del sistema de horno olla agitado con gas se ha realizado con las siguientes 3 aproximaciones:

- 1) **Modelo de fase cuasi-monofásica:** en este método se considera a la mezcla de gas y líquido como una sola fase. La dimensión, forma y distribución de la pluma de gas se deben conocer de manera empírica a priori pues no pueden ser descritas por el modelo. Se trata del modelo más simple.
- 2) **Modelo Lagrangiano-Euleriano:** en este modelo se toma a la fase gaseosa con una ecuación de trayectoria, es decir, se aproxima a que las burbujas se comporten como partículas individuales en un marco de referencia de Lagrange. Solo se resuelven las ecuaciones de conservación en un marco de referencia de Euler para la fase gas.
- 3) **Modelo Euleriano-Euleriano:** en este modelo se considera a la fase líquida como continua y a la fase gas como dispersa, pero ambas bajo el mismo marco de referencia Euleriano, por lo que se resuelven las ecuaciones de conservación para ambas fases, al ser el modelo más complejo requiere un mayor esfuerzo computacional. De acuerdo a Lou y Zhu [19] para llevar a cabo un modelado matemático adecuado con este modelo se necesita tomar en cuenta a la dispersión turbulenta de las burbujas debido a las fluctuaciones de velocidad, las fuerzas interfaciales y a la turbulencia inducida por las burbujas (Tabla 1).

### 1.5.2 Interacciones interfaciales

Dado que tanto la formación de la pluma como la recirculación del fluido en el Horno Olla son de suma importancia para un correcto modelado matemático, estos fenómenos se estudian utilizando las denominadas “fuerzas interfaciales”. Estas fuerzas se incluyen en un término extra que se adiciona a la ecuación de conservación de momentum que se resuelve para cada fase ( $\vec{F}_T$ ). Este término se obtiene al sumar las 4 fuerzas interfaciales presentes en el fenómeno, las cuales son: fuerza de arrastre, masa virtual, fuerza de

empuje y fuerza de dispersión turbulenta. De las anteriores, la principal interacción y fuerza interfacial es la de arrastre. Estas interacciones se ilustran en la Figura 1.11

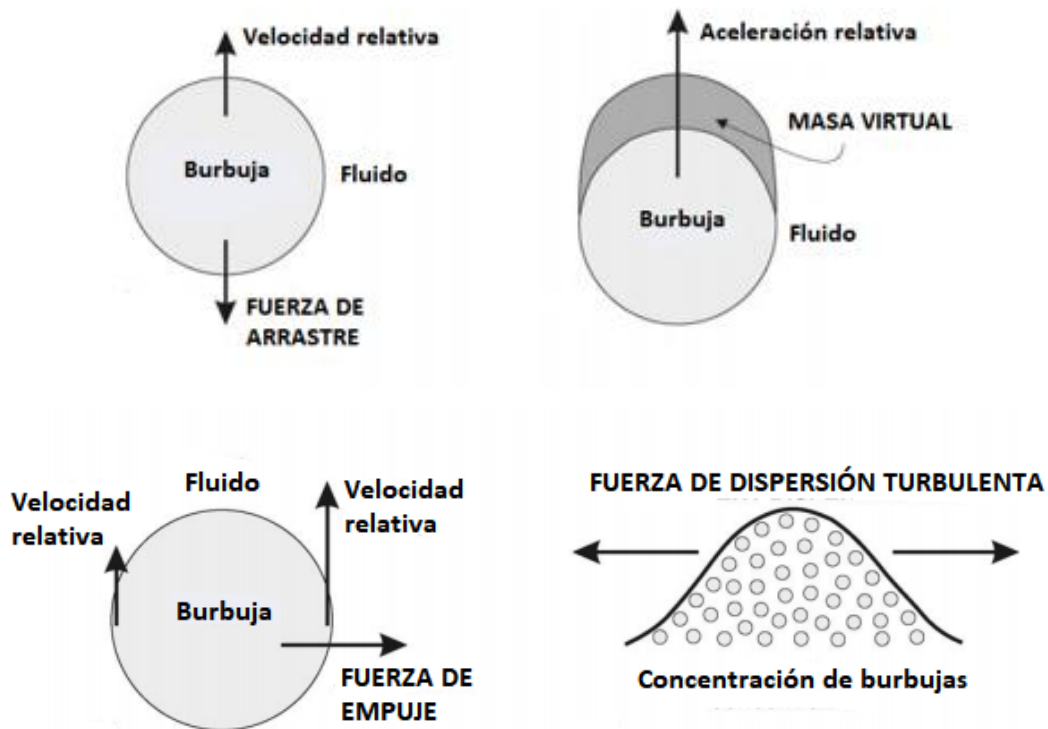


Figura 1.11 Interacciones interfaciales. Adaptado de [20].

A continuación, se describen de manera general estas interacciones:

- a) **Fuerza de arrastre:** como se muestra en la Figura 1.11 ésta actúa en sentido contrario al movimiento de la burbuja y la desacelera en su traslado hacia la superficie debido a la fuerza boyante. Esta fuerza es causada por la fricción y presión entre las burbujas de gas y el fluido.
- b) **Fuerza de empuje:** aparece cuando una burbuja, al moverse linealmente sufre una distribución asimétrica de presiones en su frontera externa.
- c) **Masa virtual:** esta es generada por la capa de fluido adherida a la burbuja y que configura una capa que no se separa de ésta, dándole una contribución de masa mayor, es decir, un “aumento virtual” de la masa de la burbuja.
- d) **Fuerza de dispersión turbulenta:** se emplea para la comprensión de la difusión entre las fases debido a las fluctuaciones turbulentas en la fase líquida, y puede ser tomada como una fuerza interfacial o bien como un término difusivo extra en la ecuación de conservación de momentum.

e) **Interacción turbulenta:** se trata de la turbulencia inducida por las burbujas en la fase líquida que puede transformar un flujo laminar en uno turbulento.

Tabla 1. Variables más relevantes del modelado matemático utilizadas por diversos investigadores del Horno Olla en los últimos años. Obtenida de [3].

NTC: No tomado en cuenta.

	López y et.al.2015 [13]	Li, Liu, Li et. al. 2014 [12]	Lou y Zhu. 2013 [19]	Liu, Qi y Xu. 2010 [21]	Méndez. Nigro. 2004 [25]
<b>Difusividad turbulenta (<math>Sc_t</math>)</b>	$Sc=1$	Se obtuvieron de acuerdo al experimento	$Sc=0.7$	$Sc=0.7$	NTC
<b>Tamaño burbuja</b>	Constante (0.01m)	Modelo Tomiyama y PBM + Saueter	Sano y Mori	$D_b=0.35(\text{flujo}^2/\text{gravedad})^{0.2}$	Diámetro medio Sauter
<b>Coefficiente de arrastre</b>	Schiller-Nauman	Schiller Nauman	Kolev	Modelo de arrastre de partícula no-esférico	Schiller-Nauman
<b>Interacción turbulenta</b>	NTC	Modelo de Sato	Lopez de Bertodano	NTC	Modelo de Sato
<b>Modelo de turbulencia</b>	k-ε Estándar	RNG K-ε	k-ε-modificado. Ctes. con turbulencia por burbujas	k-ε Estándar	Multifase k-ε

### 1.5.3 Revisión bibliográfica del modelado matemático del Horno Olla

En las últimas décadas la investigación realizada con ayuda de modelación matemática ha ido en aumento. El estado del arte en la actualidad inicia con la selección del modelo de turbulencia de Woo y colaboradores [21] pues utilizaron el modelo quasi monofásico comparando 3 formas de calcular la fracción de aire encontrando que es de suma importancia conocer la distribución espacial de la fracción de gas. Ganguly y Chakraborty [22] calcularon los tiempos de mezclado químico mediante el modelo quasi-monofásico y obtuvieron una buena relación con tiempos de mezclado medidos experimentalmente. Posteriormente, Ilegbusi y colaboradores [23] fueron los primeros en resolver las ecuaciones gobernantes para ambas fases aplicando el modelo de turbulencia en un marco

de referencia Euler-Euler obteniendo una forma de la pluma más realista. Joo y Guthrie [24] fueron los primeros en realizar modelado matemático para diferentes posiciones del tapón y para dos tapones de inyección de gas obteniendo mapas vectoriales en 3 dimensiones, concluyendo que tanto el flujo de gas como la posición del tapón tienen un efecto directo en los patrones de flujo y en el mezclado. Szekely y colaboradores [25] obtuvieron patrones de flujo y distribuciones de velocidad cuantitativas, en adición a lo anterior encontraron que el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  describe de mejor manera el comportamiento turbulento del fluido. Lou y Zhu [19] utilizaron un modelo en un marco de referencia Euler-Euler introduciendo las interacciones faciales concluyendo que la interacción turbulenta y la fuerza de arrastre son las principales fuerzas para la descripción del horno olla por medio de modelado matemático. En la Tabla 1 se muestran los parámetros empíricos con más controversia y más importantes en el modelado matemático relacionado a la dinámica de fluidos del Horno Olla, junto con algunas propuestas de su implementación. Entre los parámetros empíricos más destacados se pueden mencionar, el tamaño de burbuja, la difusividad turbulenta, el modelo de turbulencia a emplear, y el coeficiente de arrastre, entre otros. En cuanto al modelado matemático del transporte de energía en el horno olla Maldonado-Parra y colaboradores [26] evaluaron el efecto de la posición y el número de tapones tanto para el mezclado químico como para el mezclado térmico en el Horno Olla encontrando que el tiempo de mezclado se optimizó para un solo tapón en vez de utilizar dos o tres. Ahindra Ghosh [27] propuso un modelo matemático en el cual tomó en cuenta todas las pérdidas de calor presentes en el Horno Olla, lo cual es indispensable para lograr un mejor acercamiento a la realidad. Farrera-Buenrostro y colaboradores [16] utilizaron el modelo VOF acoplándolo con las pérdidas de calor del metal líquido; además propusieron 3 modelos de radiación para calcular la pérdida de calor en la superficie del baño comparando estos resultados con los obtenidos mediante el uso de la técnica PIV. Putan y colaboradores [6] con ayuda de un modelo físico validaron la similitud térmica obtenida mediante CFD, demostrando que al utilizar un modelo de 1/3 a 1/5 del tamaño original del Horno Olla y con agua a 45°C se cumple este criterio.

En otro estudio, Xia y Ahokainen [28] llevaron a cabo un análisis numérico del flujo transitorio y transferencia de calor en un horno olla agitado con gas a escala industrial demostrando que se tiene una pérdida de calor del acero líquido hacia las paredes del refractario, hacia la fase gas y de la escoria hacia el ambiente. Además, encontraron que la temperatura en la fase líquida es uniforme en la región del seno del líquido. Para calcular el coeficiente de transferencia de calor de interfase, Xia y Ahokaien [28] recurrieron a



correlaciones en términos del número de Nusselt. Concluyeron que el gas inyectado se calienta rápidamente y su temperatura alcanza la temperatura del acero a corta distancia de la salida del tapón. Castillejos y Brimacombe [21] realizaron un estudio numérico sobre la distribución transitoria del flujo y la temperatura en ollas agitadas con Argón. Su investigación se centró en el estudio del tiempo mínimo necesario de agitación para alcanzar una homogenización térmica en la olla equipada con un tapón poroso en el centro de ésta, su simulación usó un modelo cuasi-monofásico, y obtuvieron que se alcanzaba una completa homogenización con un tiempo de agitación de 180 segundos. Por último, Eric Grip y Par Jonson [15] desarrollaron un modelo CFD tridimensional en el cuál realizaron la simulación de la convección natural que se genera en un Horno Olla, esta convección natural genera una estratificación térmica en el baño de acero.

Como se aprecia en la revisión bibliográfica antes descrita, existe muy poca investigación acerca del mezclado térmico en el Horno Olla, sin embargo, éste es de suma importancia a la hora de continuar con la última etapa del proceso de fabricación de acero que es la colada continua. Se debe tener baño térmicamente uniforme y a una temperatura sumamente controlada para poder ser colado adecuadamente en las máquinas de colada continua y así alcanzar un producto final con una alta calidad metalúrgica. Por tanto, se propone la aplicación de la técnica PLIF térmico además del uso de quemadores para simular este proceso, siendo una propuesta fresca que brindará la posibilidad de obtener resultados que ayuden a la optimización del mezclado térmico en el Horno Olla. Se pretende construir un modelo matemático que represente tanto la dinámica de fluidos como la transferencia de energía para posteriormente validarlo mediante resultados experimentales obtenidos del PLIF térmico.

## **1.6 Hipótesis**

Una de las principales variables en una olla de mezclado de acero es la posición de la inyección de gas, pues esta tiene efecto tanto en la dinámica de fluidos como en el mezclado térmico del acero. Asimismo, la evolución del mezclado térmico en la olla en presencia de fuentes de energía puede ser medida mediante un modelado físico con la técnica PLIF térmico en donde se describe la evolución del mezclado térmico en un plano completo y además puede ser descrita por un modelado numérico CFD que se puede validar con estas mediciones.

## **1.7 Objetivo General**

Implementar la técnica PLIF térmico en un modelo físico de una olla agitada con gas, mediante el uso tanto de inyección axisimétrica como excéntrica para determinar cuantitativamente el mezclado térmico en ambos modos de inyección. Posteriormente, desarrollar un modelo matemático que represente adecuadamente la dinámica de fluidos y el mezclado térmico del modelo físico estudiado.

### **1.7.1 Objetivos Particulares:**

- Calibrar la técnica PLIF térmico variando la temperatura entre 20 y 60 °C de baños isotérmicos para observar el cambio en el nivel de fluorescencia de una solución de Rodamina B con la temperatura que se traduzca en una curva de calibración adecuada.
- Medir el mezclado térmico en un modelo físico de una olla agitada con gas de manera axisimétrica y excéntrica en presencia de un gradiente de temperatura inducido, a través de mapas de evolución de los contornos de temperatura medidos en un plano con la técnica PLIF térmico.
- Desarrollar un modelo numérico de un modelo físico de una olla agitada con gas que sea capaz de capturar la fluido dinámica y el mezclado térmico, medidos experimentalmente para tener un modelo realista y validado.
- Evaluar los campos térmicos predichos con el modelo y los medidos con PLIF. Así como comparar el incremento de la temperatura obtenida mediante termopares colocados en distintas posiciones del modelo físico.
- Analizar las diferencias en el mezclado térmico que surgen de inyectar el gas en las posiciones céntrica y excéntrica.

## **2 Metodología**

Dentro de la industria de la siderurgia, específicamente en la refinación secundaria, para el caso del horno olla resulta sumamente complicado la obtención de mediciones en forma directa de ciertas variables del proceso. Por tal motivo, la ingeniería de procesos metalúrgicos brinda dos poderosas herramientas como lo es el modelado matemático y el modelado físico con las cuales es posible realizar un estudio detallado del proceso mediante mediciones indirectas y así, de esta forma mejorar el mismo. Por tanto, la siguiente metodología contempla el desarrollo de un modelo físico en el cual se aplica la técnica PLIF térmico, así como la obtención de un modelo matemático que tenga la capacidad de predecir el comportamiento del proceso estudiado.

### *2.1 Modelado físico*

Un modelo físico es conocido por tratarse de una representación a escala de un proceso real o prototipo industrial usando otros materiales, donde se deben emplear ciertos criterios de similitud que garanticen la extrapolación de los resultados y observaciones obtenidas en el modelo a escala con respecto al proceso real. Para el caso de las ollas agitadas por gas utilizadas en la industria siderúrgica se han utilizado modelos acuosos para simular los fenómenos en el acero líquido tales como el mezclado térmico y la fluido dinámica. Dicho lo anterior, el modelo físico utilizado en este trabajo consta de 2 fases, las cuales son una fase gaseosa dispersa y una fase líquida continua con presencia de una fuente de calor sobre la superficie de la fase líquida; los materiales empleados para este experimento son aire, agua y un quemador en la parte superior del modelo. Para asegurar que el modelo físico fabricado verdaderamente corresponde a una adecuada aproximación a la realidad se aplicaron los siguientes criterios de similitud:

- a) Similitud geométrica
- b) Similitud dinámica
- c) Similitud cinemática
- d) Similitud térmica

#### *2.1.1 Similitud geométrica*

En un modelo físico se debe guardar una proporción entre sus dimensiones y las dimensiones que corresponden al sistema real. Esta proporción recibe el nombre de “factor de escala”  $\lambda$ , con el que es posible obtener la similitud en la geometría del modelo. Se debe tomar en cuenta que en ocasiones no es posible alcanzar este factor por lo que se deben

definir las dimensiones críticas para asegurar el estudio del proceso. Luego entonces, el factor de escala empleado en este modelo es de 1/17:

$$\lambda = \frac{\text{Dimensión del modelo}}{\text{Dimensión a escala completa}} = \frac{1}{17}$$

Por lo tanto, para obtener las dimensiones del modelo físico se aplica la relación:

$$\begin{aligned} \text{Dimensión del modelo} &= \lambda * \text{Dimensión a escala completa} \\ &= \frac{1}{17} * \text{Dimensión a escala completa} \end{aligned}$$

Como se mencionó anteriormente, dicho factor se aplica a las dimensiones críticas del sistema real, es decir, a la altura total, a la altura del metal líquido y al diámetro del Horno Olla. Como prototipo industrial se utilizaron las dimensiones y condiciones de operación de una olla industrial de 200 toneladas de la empresa TENARIS TAMSA, mostrándose las medidas y escalamiento al modelo utilizado en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones del prototipo industrial y las del modelo físico utilizado.

	D (m)	H (m)	L (m)
<b>Escala completa</b>	3.226	3.736	2.802
<b>Modelo físico</b>	0.189	0.219	0.164

D, H y L corresponden al diámetro, altura total y altura de líquido respectivamente

Una consideración a tomar en cuenta, es que el modelo físico fue construido con plexiglás, aunado a esto el modelo fue creado con fines ecológicos, ya que utiliza poca cantidad de agua para el desarrollo de cada experimento, además, el tamaño facilita su manejo y la visualización del flujo de gas a través del fluido mediante la técnica PLIF térmico.

### 2.1.2 Similitud dinámica

Esta similitud se logra cuando en dos sistemas las magnitudes de las fuerzas involucradas en ciertos puntos se encuentran en la misma relación. Dado que el fenómeno estudiado involucra fluidos, se requiere obtener dicha similitud en las fuerzas que mueven al fluido descritas por las ecuaciones de Navier-Stokes, siendo estas las siguientes: fuerza inercial, viscosa y gravitacional, además de la presión y la tensión superficial. Las fuerzas anteriormente mencionadas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales fuerzas involucradas en el Horno olla y su representación

Fuerza	Representación
Tensión superficial	$\sigma L$
Presión	$P L^2$
Gravedad	$\rho L^3 g$
Boyante	$(\rho_g - \rho) g L^3$
Inercial	$\rho L^2 U^2$
Viscosa	$\mu U / L$

Donde L, U, g,  $\mu$ ,  $\sigma$  y P son la longitud característica, la velocidad, la gravedad, la viscosidad dinámica, la tensión superficial y la presión respetivamente, mientras que  $\rho_g$  y  $\rho$  son la densidad del gas y del líquido respectivamente.

Para garantizar la similitud dinámica en el modelo se requiere cumplir una similitud entre los principales números adimensionales que contienen a las fuerzas relevantes para el flujo de fluidos en una olla. Dichos números adimensionales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Números adimensionales utilizados para representar el modelado del Horno Olla.

Número adimensional	Representación	Relación entre fuerzas
<b>Coefficiente de arrastre, <math>C_A</math></b>	$g(\rho_g - \rho) L / \rho U^2$	Gravedad/Inercial
<b>Weber</b>	$L \rho U^2 / \sigma$	Inercial/Tensión superficial
<b>Euler, Eu</b>	$P / 0.5 \rho U^2$	Presión/Inercial
<b>Froude modificado, <math>Fr^*</math></b>	$\rho_g U^2 / (\rho_g - \rho) g L$	Inercial/Gravitacional
<b>Reynolds, Re</b>	$L U \rho / \mu$	Inercial/Viscosa

En el caso del estudio del Horno Olla los números adimensionales más relevantes de los mencionados son el de Reynolds y el Froude modificado. Se debe tomar en cuenta que tiene cierta dificultad en obtener una similitud de ambos números simultáneamente. De esta forma, típicamente se conserva el número de Froude modificado ya que está demostrado que para el caso del Horno Olla las fuerzas inerciales presentan una mayor magnitud que las viscosas y que la fuerza boyante del gas provoca su ascenso y es éste el que arrastra al líquido.

Dicho lo anterior, se tiene que cumplir la siguiente relación para satisfacer la similitud dinámica:

$$Fr^*_{\text{modelo físico}} = Fr^*_{\text{prototipo industrial}}$$

Entonces, satisfacer la similitud dinámica en la práctica se logra realizando un escalamiento del flujo de gas utilizado en el Horno Olla, el cual es el principal encargado de la interacción y relación entre las fuerzas inerciales y las de gravedad (boyantes). Por tanto, expresando la equivalencia adimensional en términos de variables de operación se obtiene:

$$Q_{\text{modelo físico}} = \lambda^{2.5} Q_{\text{prototipo}}$$

Ahora bien, utilizando el factor de escala geométrico y teniendo en cuenta que en la planta TENARIS TAMSA se utilizan flujos de gas de 0.2-2 m<sup>3</sup>/min con base a ellos se pueden obtener los flujos utilizados para el modelo a escala utilizado

$$Q_m = \left(\frac{1}{17}\right)^{2.5} \left(1.83 \frac{m^3}{min}\right)$$

$$Q_m = 0.00154 \frac{m^3}{min}$$

$$0.00154 \frac{m^3}{min} \cdot \frac{1000 L}{1 m^3} = 1.54 \frac{L}{min}$$

### 2.1.3 Similitud cinemática

La similitud cinemática se logra en el momento en el que las velocidades en determinados puntos se encuentran en la misma relación y son geoméricamente similares, así como cuando los patrones de flujo y las direcciones de las velocidades son similares en ambos sistemas. Lo anterior da como motivo el uso de agua para simular el acero líquido, ya que la viscosidad cinemática del agua a 20°C es muy cercana a la del acero líquido a 1600°C como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del agua y acero líquido a condiciones de operación.

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (N*s/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
<b>Acero a 1600°C</b>	7000	0.0068	0.97*10 <sup>-6</sup>
<b>Agua a 20 °C</b>	1000	0.001	1*10 <sup>-6</sup>

Donde  $\rho$ ,  $\mu$  y  $\nu$  corresponden a la densidad, viscosidad dinámica y viscosidad cinemática respectivamente.

#### 2.1.4 Similitud térmica

Para realizar un adecuado estudio en el escalamiento térmico de un modelo físico se deben cumplir ciertos criterios de similitud térmica. Se dice que dos sistemas cumplen con similitud térmica cuando sus temperaturas a cierta ubicación y tiempo tienen una relación constante entre sí. Esto se logra cuando la rapidez de transferencia de calor por conducción, convección, generación (o disipación) y radiación en una cierta localización (o zona) en el modelo físico contiene una relación fija con la rapidez de transferencia de calor en la misma localización del sistema real. Matemáticamente, esto se representa como:

$$\frac{Q_{c,modelo}}{Q_{c,sist\ real}} = \frac{Q_{conv,modelo}}{Q_{conv,sist\ real}} = \frac{Q_{rad,modelo}}{Q_{rad,sist\ real}} = \frac{Q_{gen,modelo}}{Q_{gen,sist\ real}} = C_Q$$

Donde  $Q_c$ ,  $Q_{conv}$ ,  $Q_{rad}$ , corresponden al flujo de calor por conducción, convección y radiación respectivamente, mientras que  $Q_{gen}$ ,  $C_Q$ , corresponden al flujo de calor generado y a la constante de similitud térmica, respectivamente.

Cabe mencionar que la similitud térmica es difícil de alcanzarse en la práctica, particularmente en los modelos físicos que utilizan agua debido a las siguientes razones:

1. Las pérdidas de calor en las distintas superficies de las unidades industriales son difíciles de replicar en los modelos físicos de agua.
2. Las condiciones de flujo laminar se mantienen en la vecindad de la pared sólida. Se tiene una diferencia substancial entre el número de Prandtl del agua y del acero, lo que produce un transporte de energía en las proximidades de las paredes sólidas fundamentalmente diferente.

Como se ha dicho a lo largo de este trabajo, el principal número adimensional que se debe cumplir para un correcto escalamiento es el número de Froude, sin embargo, en estudios no isotérmicos como lo muestra Mazumdar [29] junto con este valor es necesario satisfacer la siguiente identidad entre el modelo y la escala completa del sistema:

$$(\beta\Delta T)_{modelo\ físico} = (\beta\Delta T)_{escala\ completa\ del\ sistema}$$

Donde  $\beta$  corresponde al coeficiente de expansión térmica [1/K],  $\Delta T$  se refiere a la diferencia de temperatura.

Junto con esto, de acuerdo a los estudios de balances macroscópicos de energía de Pan y Bjorkman [30] se ha demostrado que la relación de flujo de calor superficial entre los modelos de agua y los Hornos Olla reales varían con la siguiente proporción:

$$\frac{q_{\text{modelo físico}}}{q_{\text{escala completa}}} = (0.283\lambda^{0.5})$$

Donde  $q_{\text{modelo físico}}$ ,  $q_{\text{escala completa}}$ ,  $\lambda$  corresponden al flux del modelo físico, flux del prototipo industrial y al factor de similitud geométrica.

Al ser complejo medir los flujos de calor que inciden en el modelado físico con un quemador de gas, se decidió como primera aproximación que la similitud de los campos térmicos entre los dos sistemas se logra al igualar las rampas de calentamiento en ambos sistemas de aproximadamente **1°C/minuto**. En la Tabla 6 se presentan por referencia las propiedades termofísicas de los fluidos en el modelo a 333K y prototipo a 1853K.

Tabla 6. Propiedades termofísicas del acero líquido y el agua.

Propiedad	Unidades	Acero líquido (1853K)	Agua (333K)
<b>Conductividad térmica</b>	W / (m K)	27.9	0.637
<b>Capacidad calorífica</b>	J / (kg K)	787	4182
<b>Expansión térmica</b>	K <sup>-1</sup>	0.00015	0.0005

### 2.1.5 Propiedades físicas

Los materiales utilizados experimentalmente son agua para simular el acero líquido, aire para simular la inyección de Argón, combustión de gas butano/propano mediante el uso de un quemador para simular los arcos generados en los electrodos del Horno Olla y Rodamina B la cual, por su propiedad fluorescente se utilizó como trazadora en la técnica de PLIF térmico. Las propiedades de los materiales anteriormente mencionados se muestran en la Tabla 7.



Tabla 7. Propiedades físicas de las sustancias utilizadas.

Material/ Sustancia	Agua	Aire	Rodamina B	Gas L.P
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1000	1.23	1310	0.54
<b>Viscosidad dinámica (kg/ms)</b>	1x10 <sup>-3</sup>	1.79x10 <sup>-5</sup>	----	----

El reactivo que se ha utilizado recientemente para esta técnica es la Rodamina B. La Tabla 8 muestra sus propiedades:

Tabla 8. Propiedades de la Rodamina B.

Propiedad	Valor
<b>Fórmula Química</b>	C <sub>28</sub> H <sub>31</sub> ClN <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Peso molecular</b>	479.01 g/mol
<b>Solubilidad (agua)</b>	0.8 g/100mL
<b>Absorción <math>\lambda_{\max}</math> (agua)</b>	554 nm
<b>Fluorescencia <math>\lambda_{\max}</math> (agua)</b>	576 nm

## 2.2 Experimentación

En cuanto a los experimentos realizados se modificó únicamente una variable, la cual fue la posición de la inyección de gas, céntrica y excéntrica en una posición de 0.5R. Además, se implementó el uso de un quemador para simular uno de los arcos que se generan por encima del metal líquido en el Horno Olla, cuya función es mantener la temperatura del acero en un valor adecuado. Mediante el uso de la técnica PLIF térmico se obtuvieron contornos de temperatura en función del tiempo de calentamiento. Para validar el uso de la técnica de PLIF térmico se colocaron 5 termopares en distintas posiciones del modelo físico con los cuales se evaluó el aumento de temperatura en función del tiempo. En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente la posición de los termopares.

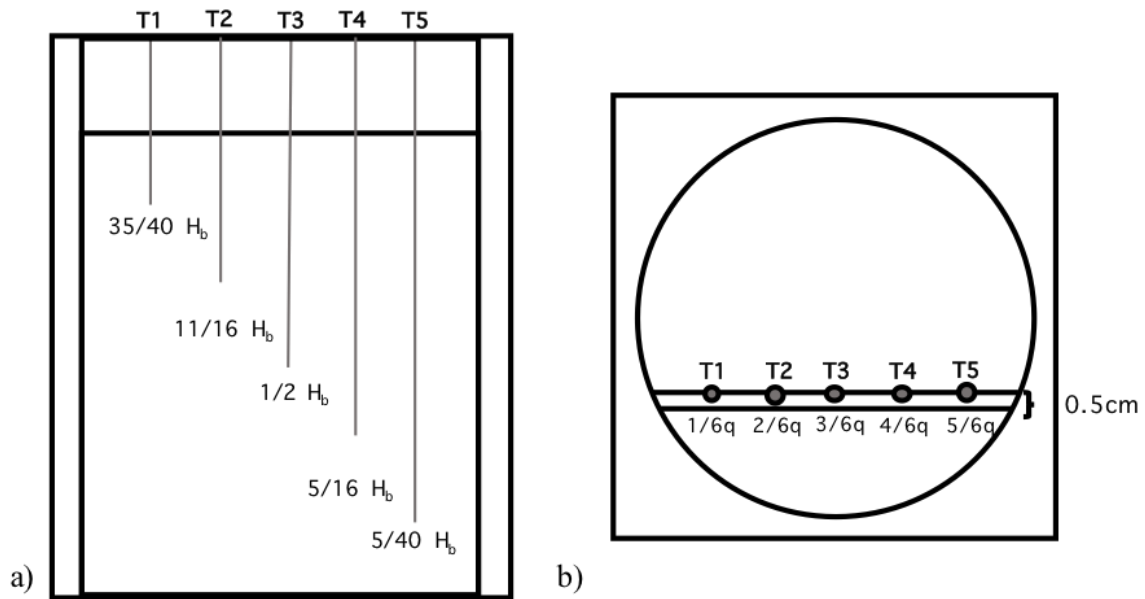


Figura 2.1 Diagrama de la posición de los termopares en el modelo físico. a) vista lateral, b) vista superior.

Las condiciones experimentales que se siguieron fueron las siguientes:

- Modelo físico escala 1/17.
- Modelo bifásico (gas-agua).
- Un solo tapón de inyección de gas.
- Un solo flujo de gas (1.54 lpm).
- Solo un quemador en la superficie de agua.
- Se utilizaron 5 termopares para analizar la evolución de la temperatura en el modelo físico.
- La concentración de Rodamina B fue de  $202 \mu\text{g/L}$ .

La matriz experimental se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de experimentos realizados.

Experimento	Flujo de gas (lpm)	Posición radial del tapón $r/R$ (m/m)
1	1.54	0
2	1.54	0.5

La información previamente obtenida de estos experimentos es:

- ✓ Patrones de flujo (PIV). Esto para ambos experimentos con inyección de gas. Para una descripción completa de la técnica y las condiciones de procesamiento se recomienda consultar el trabajo de Martijn Mommén [31] de donde además se tomaron los resultados experimentales.

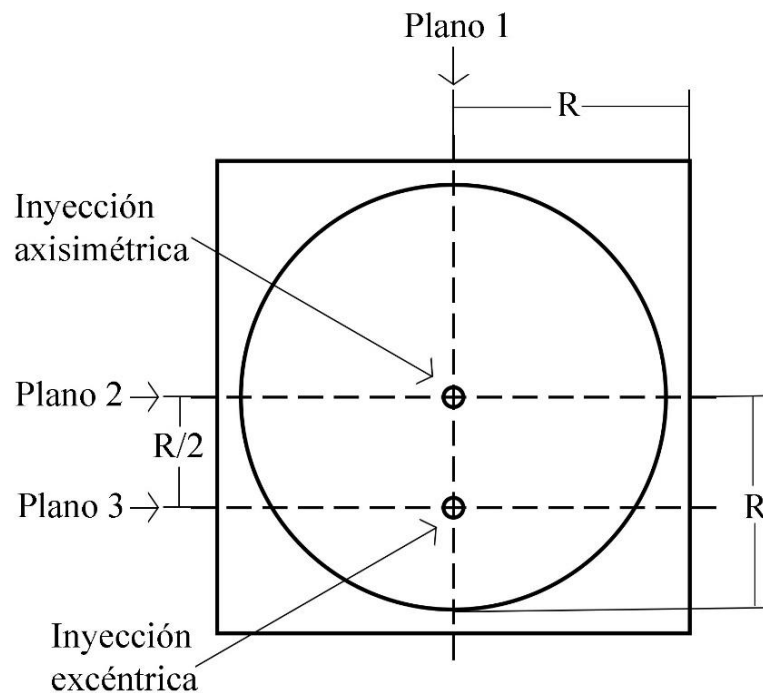


Figura 2.2 Planos de medición. Experimentos PIV y PLIF.

De acuerdo a la Figura 2.2, para la obtención de los contornos de PLIF térmico se hicieron únicamente mediciones en el plano a  $R/2$  (plano espejo al plano 3) recordando la simetría que el modelo físico ofrece.

### 2.3 Arreglo experimental

Las Figuras 2.3 y 2.4 muestran el acomodo de todos los componentes utilizados en el experimento, los cuales se detallan en la Tabla 10.



Figura 2.3 Vista frontal del arreglo experimental utilizado en la técnica de PLIF térmico. Descripción de los componentes en Tabla 10.



Figura 2.4 Vista lateral del arreglo experimental utilizado en la técnica de PLIF térmico. Descripción de los componentes en Tabla 10.

Tabla 10. Clasificación de los componentes utilizados para la realización de la técnica de PLIF térmico de la Figura 2.3.

Número	Nombre del componente
1	Calentador y termómetro de resistencia empleado para realizar la calibración.
2	Computadora a la que se enviaron los datos obtenidos de los termopares.
3	Adquisidor de datos de temperatura.
4	Equipo controlador de intensidad y forma del haz del láser.
5	Láser.
6	Modelo físico a escala 1/17 de plexiglás. (Con enmascaramiento para sombras).
7	Estructura fabricada para sostener los termopares introducidos en el baño de agua y también al quemador colocado en la parte superior del agua.
8	Compresor de aire.
9	Cámara fotográfica para tomar imágenes de ojo de escoria y LIF (Canon EOS Rebel T5)
10	Tanque de gas marca linmex.

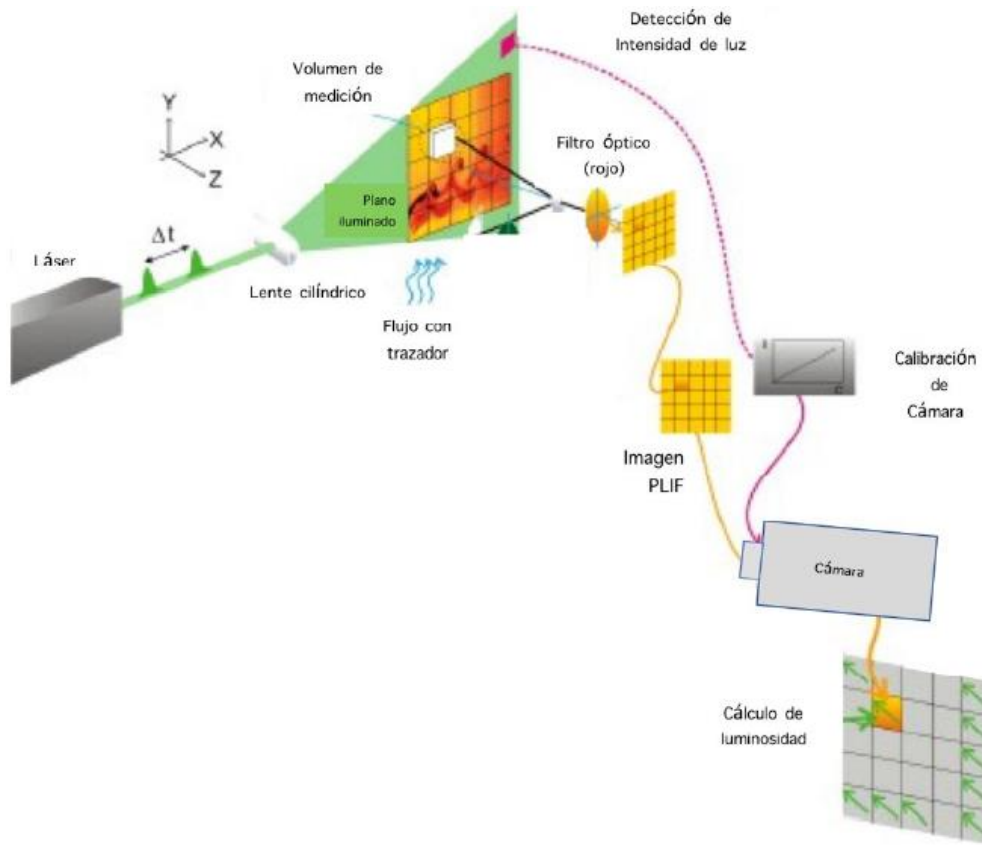


Figura 2.5. Diagrama del sistema para la implementación de la técnica de PLIF. Obtenida de [32]

## *2.4 Metodología para uso de PLIF*

Un esquema del funcionamiento de la técnica PLIF se muestra en la Figura 2.5 y describe de manera gráfica las etapas del uso de esta técnica para medir contornos de temperatura instantáneos en un plano de una olla agitada con gas. Una descripción completa de la técnica se puede revisar en la tesis de Ana Gómez [32].

### *2.4.1 Método experimental*

Una vez que el modelo físico ya se encuentra bajo las condiciones que se busca analizar (flujo de gas, posición de la inyección, concentración de Rodamina) se deben remover las burbujas que puedan haber quedado tanto en la chaqueta como en la parte interna del modelo. Esto se realiza mediante el uso de una manguera, posteriormente se enciende el láser y al incidirlo en el fluido se busca eliminar cualquier fuente de luz (reflejos) que pudiera afectar la medición de las imágenes captadas. Se toma una grabación, el tiempo de esta depende del tipo de prueba que se esté llevando a cabo. Una vez que se concluyó la grabación del video, se apaga el láser y se prepara el sistema para la siguiente medición.

### *2.4.2 Tratamiento de imágenes*

Antes de que se obtenga la intensidad luminosa de los resultados, es necesario convertir los videos grabados a una serie de imágenes en escala de grises y posteriormente, mediante el uso de un código ser procesadas en MATLAB®. Dicho lo anterior, para procesar el video a imágenes se hace uso del programa “Free Video to JPG Converter” con el cual se capturó una imagen cada 3 cuadros del video, siendo esto equivalente a procesar una imagen cada 0.1 segundo del video. Una vez que se obtienen las imágenes se continúa con el enmascaramiento de las mismas, esto con el fin de recortar las áreas de no interés para solo dejar el área del fluido a analizar. Para esta acción se hizo uso del software XnConvert®. Las imágenes fueron convertidas a escala de grises 256.

### *2.4.3 Calibración*

Esta se basa en obtener y registrar la luminosidad del baño a diferentes temperaturas. De manera experimental se tomaron 6 videos de alrededor de 3 segundos del modelo físico incidido por el láser cuya concentración de rodamina B empleada fue de 202 µg/L. Se tomaron en cuenta 5 temperaturas: temperatura ambiente, 30, 40, 50 y 60 °C. La medición de las distintas temperaturas se realizó de manera gradual de menor a mayor. Para aumentar la temperatura del agua en el modelo se utilizó un calentador de resistencia que además tiene la función de termómetro. Posteriormente se realizó el procesamiento de los

videos obtenidos mediante lo ya descrito anteriormente obteniéndose la imagen de la Figura 2.6 y con el tratamiento descrito antes para cada temperatura empleada en la calibración, se construyó una curva de calibración (ver Figura 2.7).

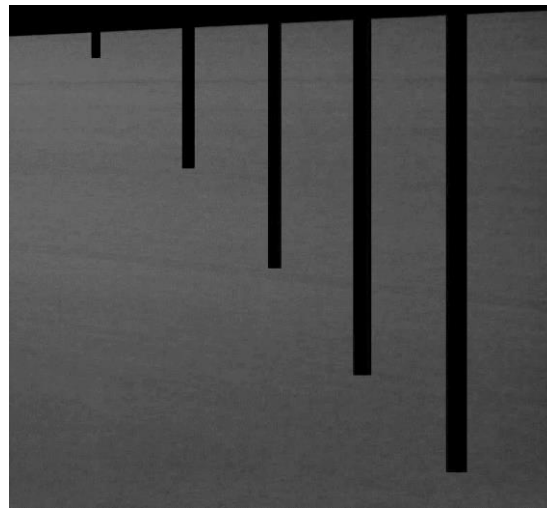


Figura 2.6 Toma de imagen para hacer calibración de la técnica de PLIF térmico. Imagen tomada a temperatura ambiente.

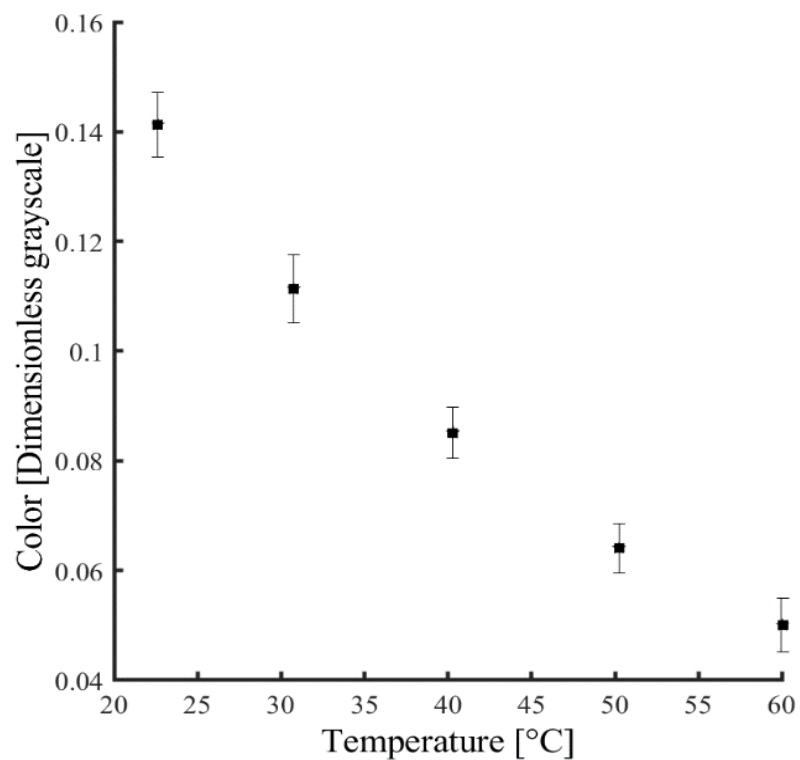


Figura 2.7 Curva de calibración PLIF térmico que da la relación entre la luminosidad del trazador y la temperatura.

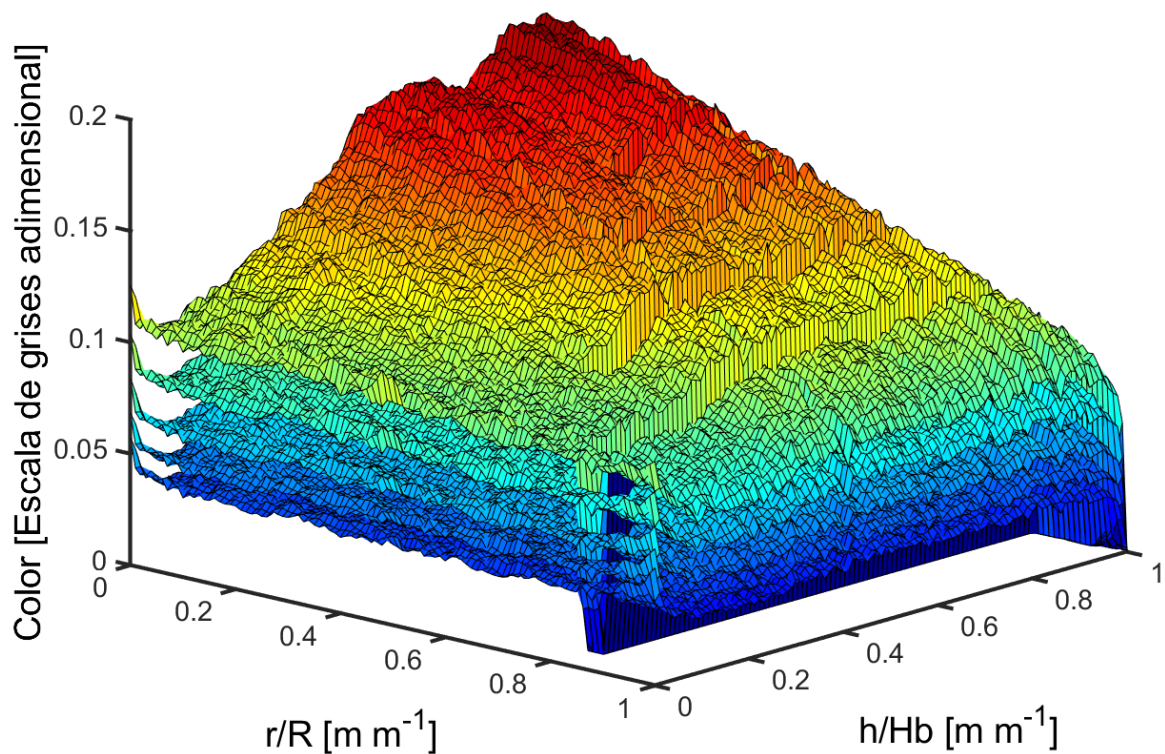


Figura 2.8 Gráfico de calibración de color correspondiente a una sola temperatura para cada pixel del plano medido.

Por desgracia y a pesar de que la imagen de la Figura 2.6 parece tener un valor en la escala de grises homogénea, la Figura 2.8, la cual exhibe la luminosidad en el plano, muestra que no es así, es decir, hay más luz en la parte del plano cercano a la fuente laser que en la zona alejada de él y más luminosidad arriba que abajo en ese plano. Es decir, se puede determinar con una mayor precisión la luminosidad correspondiente a cada pixel y asociarla a la temperatura de calibración. De esta forma, se generó una malla de 100 x 100 pixeles para tener un gráfico de calibración de color gris en función de cada pixel en cada posición específica a fluorescencia de la rodamina (ver Figura 2.8).

#### 2.4.4 Procedimiento para el uso de la técnica PLIF en el mezclado térmico y procesamiento de imágenes

Una vez instalado todo el sistema para la implementación de la técnica PLIF como se muestra en la Figura 2.3 el momento en que la inyección de aire era constante, se partió de una temperatura ambiente, se tomó un video de 10 minutos para cada experimento (céntrico y excéntrico). Como se muestra en la Figura 2.3, el mezclado térmico se indujo a través de colocar un dispositivo de calentamiento ubicado en el centro del baño a 5 cm de



la superficie de agua, además se colocó una fuente de aire (mediante el uso de una manguera) para impedir que la flama cesara. Como se mencionó antes, la concentración de Rodamina B fue de 202  $\mu\text{g/L}$ . Finalmente se procesaron los videos a imágenes (1 imagen cada 0.1 segundo) y mediante el uso de la calibración y MATLAB® se asignó la temperatura y el cambio de esta de cada pixel de acuerdo a su color en la escala de grises.

#### *2.4.5 Implementación de termopares para la validación de la técnica de PLIF térmico y modelado matemático*

Para comprobar que los resultados obtenidos mediante la técnica de PLIF térmico son confiables se instrumentó el modelo físico con 5 termopares tipo K como lo muestra la Figura 2.1. Estos termopares fueron conectados a un adquisidor de datos para registrar las temperaturas por medio del uso del software DaqView®. Se debe tomar en cuenta que tanto la aplicación de la técnica de PLIF térmico como la implementación de los termopares se realizó en un solo experimento, tanto para el excéntrico como para el céntrico y cada experimento se realizó por duplicado.

### *2.5 Modelado matemático*

Este modelado se basa en el uso de leyes fundamentales y ecuaciones gobernantes. La resolución de las ecuaciones planteadas se realiza de manera numérica y en muchas ocasiones por medio del empleo de software especializado, esto da como resultado el uso del CFD ANSYS FLUENT® para la resolución del fenómeno estudiado.

#### *2.5.1 Suposiciones*

Dado que el fenómeno estudiado es de alta complejidad, es necesario realizar consideraciones que simplifiquen esta dificultad matemática sin perder de vista la estrecha relación con la realidad, esto para poder llegar a una solución. Dicho lo anterior, las suposiciones realizadas para la resolución del modelo son las siguientes:

1. Se asume estado estable para las ecuaciones de momentum, continuidad y el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable*.
2. Se asume presencia de gradientes de temperatura en el fluido por lo que la ecuación de energía se resuelve en estado transitorio.
3. Se asume el marco de referencia Euleriano y se asume el modelo multifásico Euler-Euler.

4. Se asume que la fase gas (aire) tiene una forma esférica y que tiene un diámetro constante igual a 0.01m.
5. El coeficiente de arrastre describe la interacción principal entre la fase líquida (agua) y la fase gas (aire), es decir, la fuerza de arrastre.
6. El modelo de la olla tiene un plano de simetría, por lo tanto, solo se resuelve la mitad del modelo en tres dimensiones.
7. Se asume que las fases presentes (aire y agua) son fluidos newtonianos e incompresibles por lo que sus propiedades son constantes.
8. El sistema permite la salida de aire por la superficie.
9. No se toman en cuenta la presencia de especies químicas, por lo que no se resuelve la ecuación de conservación de especies químicas.
10. Se asume que no existen pérdidas de energía por radiación en la superficie libre.

### **2.5.2 Ecuaciones gobernantes**

Para poder representar y explicar los fenómenos que ocurren en un modelo físico es necesario el uso de ecuaciones gobernantes las cuales tienen la capacidad de describir dichos fenómenos, que para el caso de estudio son las siguientes:

- a) Ecuación de conservación de fracción de volumen de cada fase.
- b) Ecuación de continuidad para cada fase.
- c) Ecuación de conservación de momentum para cada fase. (Ecuaciones de Navier-Stokes).
- d) Ecuaciones de conservación asociadas al modelo de turbulencia *k-ε Realizable* solo aplicable a la fase líquida.
- e) Ecuaciones de fuerzas de interfase.
- f) Ecuación de conservación de energía.

#### **a) Ecuación de conservación de fracción de volumen de cada fase**

El volumen de la fase q,  $V_q$ , está dado por la integral de volumen:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV$$

Donde  $\alpha_q$  es la fracción de volumen de la fase q, por lo tanto, la suma de la fracción de volumen de todas las fases debe de ser 1:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$$

La densidad efectiva de la fase q esta dada por:

donde  $\rho_q$  es la densidad física de la fase q.

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q$$

### **b) Ecuación de continuidad para cada fase**

Asumiendo un fluido incompresible:

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0$$

Donde  $\rho_q, \vec{v}_q$  son la densidad y el vector velocidad de la q-ésima fase respectivamente.

### **c) Ecuación de conservación de momentum para cada fase**

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_q \mu_{ef,q} (\nabla \vec{v}_q + (\nabla \vec{v}_q)^T)) + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \vec{F}_T$$

Para la fase líquida:

$$\mu_{ef,liq} = \mu_{l,liq} + \mu_{t,liq}$$

Para la fase gas:

$$\mu_{ef,q} = \mu_{l,q}$$

Donde  $P, \mu_{ef,q}, \vec{g}$  son la presión, la viscosidad efectiva de la fase q y la aceleración de la gravedad respectivamente. La viscosidad efectiva para la fase líquida es la suma de la viscosidad molecular del líquido ( $\mu_{l,liq}$ ) y la viscosidad turbulenta de la fase q ( $\mu_{t,liq}$ ), definida por el modelo de turbulencia utilizado. Para la fase gaseosa se usa la viscosidad molecular del gas ( $\mu_{l,q}$ ). Finalmente,  $\vec{F}_T$  es la suma de fuerzas interfaciales.

**d) Ecuaciones de conservación asociadas al modelo de turbulencia k-ε Realizable**

Al tratarse de un sistema bifásico se deben tomar en cuenta las contribuciones de la turbulencia debidas a la interacción entre las fases y al burbujeo. De esta forma, las ecuaciones de conservación de la energía cinética turbulenta y la de la disipación de la energía cinética turbulenta, se resuelven solamente para la fase primaria, la cual corresponde al agua. De acuerdo a la literatura, el modelo k- ε se ha utilizado típicamente para resolver una sola fase turbulenta, ahora bien, con el pasar de los años se han desarrollado dos modelos más, los cuáles son el RNG k- ε y el k- ε Realizable. Estos modifican o agregan términos a las ecuaciones de turbulencia. De los anteriores modelos revisados, el que se implementa en este proyecto es el k- ε Realizable, que tiene como principal diferencia que  $C_\mu$  se convierte en un término que no es constante y es función de parámetros adicionales y que fue el modelo que mejor representó la turbulencia al comparar las predicciones contra mediciones experimentales en el trabajo previo de Daniel Maldonado [33]. A continuación, se expresan las ecuaciones a resolver:

La viscosidad turbulenta se define como:

$$\mu_{t,liq} = C_\mu \rho_l \frac{k_l^2}{\varepsilon_l}$$

De donde:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k_l U^*}{\varepsilon_l}}$$

Así se define a  $A_0$ ,  $A_S$  y  $U^*$ , los cuales son parámetros del modelo que involucran tasas de rotación y velocidades angulares del fluido.

La ecuación de conservación de la energía cinética turbulenta (k):

$$\nabla \cdot (\alpha_l \rho_l k_l \vec{v}_l) = \nabla \cdot \left( \alpha_l \left( \mu_l + \frac{\mu_{t,liq}}{\sigma_k} \right) \nabla k_l \right) + \alpha_l G_{k,l} + \alpha_l G_b - \alpha_l \rho_l \varepsilon_l + \alpha_l \rho_l \Pi_{k,l}$$

La ecuación de conservación para la disipación de la energía cinética turbulenta (ε):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \varepsilon_l \vec{v}_l) = & \nabla \cdot \left( \alpha_l \left( \mu_l + \frac{\mu_{t,liq}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_l \right) + \alpha_l C_1 \left( \frac{\varepsilon_l}{k_l} G_b C_3 + \rho_l \Pi_{\varepsilon,l} \right) - \alpha_l \rho_l C_2 \frac{\varepsilon_l^2}{k_l + \sqrt{\frac{\varepsilon_l \mu_l}{\rho_l}}} \\ & + \alpha_l \rho_l \Pi_{\varepsilon,l} \end{aligned}$$

Donde  $G_{k,l}$  es la producción de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad promedio de la fase líquida agua.  $G_b$  es la energía cinética turbulenta adicional inducida por las burbujas (interacción turbulenta).  $k_l$  y  $\varepsilon_l$  son la energía cinética turbulenta y la disipación de dicha energía de la fase líquida agua (l) respectivamente.  $C_1, C_2, C_3, \sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son constantes del modelo con valores de 1.44, 1.92, 1.3, 1.0 y 1.3 respectivamente.  $\Pi_{k,l}$  y  $\Pi_{\varepsilon,l}$  representan la influencia de la fase dispersa (aire) en la turbulencia de la fase continua (agua) y se definen como:

$$\Pi_{k,l} = K_{gl} \frac{\rho_g}{\rho_l + \rho_l C_A} (-2k_l + k_{gl} + \vec{v}_{rel} \cdot \vec{v}_d) g \alpha_g$$

$$\Pi_{\varepsilon,l} = C_3 \frac{\varepsilon_l}{k_l} \Pi_{k,l}$$

$K_{gl}, C_A, k_{gl}, \vec{v}_{rel}$  y  $\vec{v}_d$  están definidas por las fuerzas de interfase descritas a continuación.

### e) Ecuaciones de fuerzas de interfase

Dentro de la ecuación de conservación de momentum mostrada anteriormente, se agrega un término adicional, el cual se refiere a las contribuciones por las interacciones entre las fases presentes. Este término  $\vec{F}_T$  se define como:

$$\vec{F}_T = F_A + F_{MV} + F_E + F_{DT}$$

Donde  $F_A, F_{MV}, F_E, F_{DT}$  son la fuerza de arrastre, la masa virtual, la fuerza de empuje y la fuerza de dispersión turbulenta respectivamente. Tanto la masa virtual como la fuerza de empuje no tienen una gran contribución comparada con la fuerza de arrastre por lo que pueden ser ignoradas. La fuerza de arrastre es la fuerza dominante y la más importante en el fenómeno estudiado. La fuerza de dispersión turbulenta, por el contrario, puede llegar a tener cierta importancia y debe de tomarse en cuenta.

### Fuerza de empuje

Esta fuerza se define como:

$$F_E = -\alpha_g C_E \rho_l (\vec{v}_g - \vec{v}_l) \times (\nabla \times \vec{v}_l)$$

Donde  $C_E$  es el coeficiente de empuje y puede tener valores de 0.02, 0.1 y 0.5. Se utilizó el valor de 0.5.

### **Fuerza de dispersión turbulenta**

$$F_{DT} = K_{gl} \vec{v}_d$$

Donde  $K_{gl}$  es el coeficiente de intercambio de momentum en la interfase, el cual depende del modelo utilizado y  $\vec{v}_d$  es la velocidad a la deriva que es la relación entre la velocidad fluctuante y la distribución espacial de las partículas definida como:

$$\vec{v}_d = \frac{D_{gl}^t}{\omega_{gl}} \left( \frac{1}{\alpha_l} \nabla \alpha_l - \frac{1}{\alpha_g} \nabla \alpha_g \right)$$

$$D_{gl}^t = \frac{1}{3} k_{gl} \tau_{gl}^t$$

El coeficiente de dispersión turbulenta está definido por  $k_{gl}$  el cual representa el coeficiente de correlación entre las fluctuaciones de velocidad de las fases líquida y gas y también es utilizado para modelar la interacción turbulenta.  $D_{gl}^t$  y  $\omega_{gl}$  son el coeficiente de dispersión turbulenta y el número de Prandtl de dispersión respectivamente, éste típicamente toma el valor de 0.75.  $\tau_{gl}^t$  representa el tiempo turbulento característico de las burbujas. Se trató de modelar la dispersión turbulenta mediante el uso del coeficiente de López de Bertodano, sin embargo, no se logró converger la solución por lo que al final la dispersión turbulenta no se empleó.

### **Fuerza de arrastre**

Finalmente, la fuerza de arrastre es la fuerza de mayor importancia en el estudio del modelo matemático ya que es la interacción entre la fase líquida y la fase gas, se define como:

$$F_A = \frac{3\alpha_g \alpha_l \rho_l C_A}{4\bar{d}_g} (\vec{v}_g - \vec{v}_l)$$

Dónde  $C_A$  es el coeficiente de arrastre y tiene distintas definiciones dependiendo del modelo utilizado,  $d_g$  es el diámetro promedio de las burbujas. Dicho lo anterior, el modelo de arrastre que mejor se adapta al fenómeno estudiado es el modelo "symmetric", el cuál define a  $C_A$  como:

$$C_A = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15Re^{0.687})}{Re} & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

**g) Ecuación de conservación de energía**

La siguiente ecuación se resuelve para cada fase:

$$\frac{\partial(\rho_q R_q H_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_q \underline{v}_q R_q H_q) - \nabla \cdot (\Gamma_{R_q} R_q \nabla H_q) - \nabla \cdot (\Gamma_{R_q} H_q \nabla R_q) = S_{H_q} + S_{H_l}^{IP}$$

Dónde  $H_q$  representa la entalpia o energía térmica de la fase q,  $S_{H_q}$  es el término fuente para la transferencia de calor dentro de la fase q,  $R_q$  corresponde a la fracción de volumen de la fase q y  $S_{H_l}^{IP}$  es el termino fuente para la transferencia de calor en la interfase.

Los términos fuente en la ecuación anterior se definen por las siguientes expresiones:

$$S_{H_q} = \phi_v^l + \frac{\partial P_q}{\partial t} + \underline{v}_q \cdot \nabla P_q$$

$$S_{H_q}^{IP} = h_{l-g} A_s (T_g - T_l)$$

En las ecuaciones anteriores  $\phi_v^l$  es la función de disipación viscosa para la fase q.  $P_q$  es la presión dinámica de la fase q,  $h_{l-g}$  es el coeficiente de transferencia de calor en la interfase l-g dado por:

$$h_{l-g} = \frac{k_l Nu_l}{D_p}$$

Dónde  $k_l$  es la conductividad térmica de la fase l,  $Nu_l$  es el número Nussel local para la fase l,  $D_p$  es el diámetro de burbuja y  $A_s$  es el área de la superficie de todas las burbujas expresado por la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{6R_G V_{cell}}{D_p}$$

Siendo  $V_{cell}$  el volumen de cada celda en el dominio y, finalmente  $T_g$  y  $T_l$  son las temperaturas de las fases gas y líquida, respectivamente.

El coeficiente de difusión para la fase l,  $\Gamma_{R_l}$  se define en términos de las viscosidades laminar y turbulenta  $\mu_l, \mu_l^{turb}$  así como de los números de Prandtl laminar y turbulento:

$$\Gamma_{R_l} = \frac{\mu_l}{Pr(R_l)} + \frac{\mu_l^{turb}}{Pr^{turb}(R_l)}$$

Finalmente, el coeficiente de difusión dentro de la fase I, para conservación de momentum y conservación de energía ( $\Gamma_w, \Gamma_{H_l}$ ) se definen de manera similar. Junto con las ecuaciones anteriores se debe aplicar la siguiente expresión en cada nodo:

$$R_l + R_g = 1$$

Como se mencionó anteriormente, el modelo de turbulencia k- $\epsilon$  Realizable se aplica únicamente a la fase líquida para calcular la energía cinética turbulenta (k), la disipación de la energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ ) y la viscosidad turbulenta del líquido ( $\mu_l^{turb}$ ).

Las pérdidas globales de temperatura en el baño se calculan mediante la suma de la contribución de las pérdidas por convección y conducción. La transferencia de calor por radiación en un prototipo industrial se considera importante debido a que el acero presenta una capa de escoria en la parte superior en donde se forma un ojo [26] en esta zona, existe una interfase entre el metal líquido y la atmósfera. De los modelos revisados [16] respecto a la radiación, se consideran 3 principales: modelo de Rosseland, modelo P-1 y el modelo de ordenadas discretas. De los cuales el que mejor se adapta es el modelo de Rosseland. Sin embargo, en el caso del modelo físico bajo estudio se considera que no existe tal capa de escoria, además de que la temperatura absoluta en el modelo físico es mucho menor que la del prototipo, por lo que no es necesario tomar en cuenta esta pérdida de calor.

### 2.5.3 Condiciones de frontera

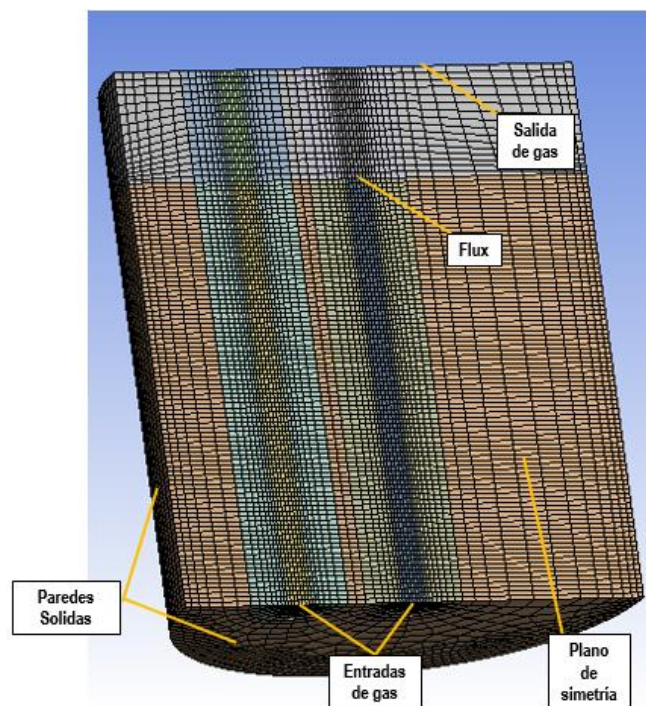


Figura 2.9. Condiciones de frontera del modelo matemático para la inyección céntrica y excéntrica.



En la Figura 2.9 se muestran las condiciones a la frontera que a continuación se detallan:

**1. Plano de simetría:** se cataloga como una superficie en donde todos los flujos convectivos y difusivos de todas las cantidades transportadas, es decir, masa, momentum y energía, tienen un valor igual a cero.

**2. Paredes sólidas:** se aplica condición de no deslizamiento, por lo que la velocidad vale cero y se presenta una zona laminar adyacente a las paredes que además son impermeables. La zona laminar adyacente a las paredes sólidas se conecta con el núcleo turbulento del fluido a través del uso de “funciones pared estándar”.

**3. Salida de gas:** se considera una superficie libre abierta a la atmósfera y solamente la fase gas tiene permitido abandonar el sistema. La presión en esta frontera es de 1 atmósfera o 101325 Pa.

**4. Entrada de gas:** únicamente se permite la entrada de la fase gas de manera perpendicular a la entrada.

**5. Flux de calor por el quemador:** esa zona tiene un comportamiento dual pues al momento de correr la simulación sin activar la ecuación de conservación de energía esta actúa como un interior dentro del modelo, posteriormente, al activar la ecuación de energía esta adquiere un comportamiento de pared sólida en donde se aplica un flux proveniente del jet producido por el quemador (ver Apéndice A).

#### 2.5.4 Solución numérica en ANSYS FLUENT®

Para resolver las ecuaciones gobernantes descritas en los puntos anteriores se utilizó el CFD Ansys Fluent versión 19.0, una de las mejoras que se buscó obtener en este proyecto fue el de reducir el tiempo de cómputo, ya que el mallado de Martijn [31] consumía días. Por esta razón, se recurrió al diseño de una nueva malla, la cual mantuviera la misma calidad, pero con una menor cantidad de nodos. Dicho lo anterior, la malla creada fue la mostrada en la Figura 2.9, con 75684 nodos. Se tomó en cuenta una refinación de la malla en las zonas de inyección de gas y también en la zona donde se encontraba la fuente energía (Flux de calor). La Tabla 11 muestra los parámetros más representativos de calidad de la malla utilizada.

Tabla 11. Características de la malla utilizada.

	Aspect ratio (Relación de dimensiones)	Ortogonalidad	Skweness (oblicuidad)
<b>Mínimo</b>	1.02	0.64	$7.99 \times 10^{-3}$
<b>Máximo</b>	6.92	1.00	0.48
<b>Promedio</b>	2.54	0.97	0.14
<b>Desviación estándar</b>	0.95	$4.25 \times 10^{-2}$	0.11

### 2.5.4.1 Dinámica de fluidos

Para la resolución de la fluidodinámica se tomó como monitor una superficie a una altura de 16 cm en el modelo matemático en la cual se midió la velocidad de agua promedio, con lo que, al momento de mostrarse un comportamiento constante por parte de dicho monitor con respecto a las iteraciones, se consideraba que la solución ya había alcanzado la estabilidad (ver Figura 2.10). Dentro de Ansys Fluent® se ajustaron las fronteras, modelo de turbulencia, ecuación de energía, entradas de gas, etc. Finalmente, para la resolución del modelo se aplicó un caso pseudo-transitorio definiéndose un paso de tiempo de 0.1 segundo, el tiempo de computo fue de alrededor de 3 horas, deteniéndose en aproximadamente 12000 iteraciones el cálculo. Para validar el modelo propuesto se trazaron 3 líneas perpendiculares a 4, 8 y 12 cm de la dirección Z comparando los resultados obtenidos mediante la técnica PIV y los obtenidos mediante CFD.

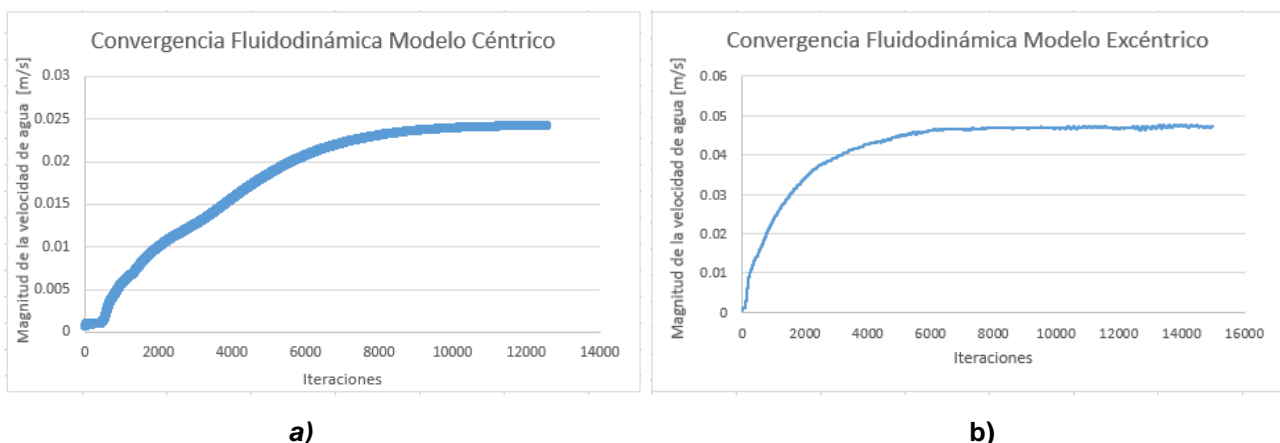


Figura 2.10 Convergencia determinada por monitor de velocidad de agua. a) Modelo céntrico, b) Modelo excéntrico.

### 2.5.4.2 Conservación de energía

Para la resolución de la ecuación de conservación de energía se llevó a cabo el siguiente procedimiento: una vez que se alcanzó el estado estable en la fluidodinámica, se modificó el método de solución de estado estable a estado transitorio y se desactivó la solución numérica de las ecuaciones de conservación de fracción de volumen, conservación de momentum y continuidad, activando únicamente la ecuación de conservación de energía y dejar que esta fuera dependiente del tiempo. Se seleccionó un paso de tiempo de 0.1 segundo siendo un total de 600 pasos de tiempo. Por cada paso de tiempo se ejecutaron 25 iteraciones y el tiempo total de cálculo fue de aproximadamente 3 horas. Para validar la simulación se colocaron 5 monitores de temperatura en el modelo matemático como se muestra en la Figura 2.11, en las mismas posiciones en que los termopares fueron colocados en el modelo físico tomando en cuenta la simetría que el modelo proporciona.

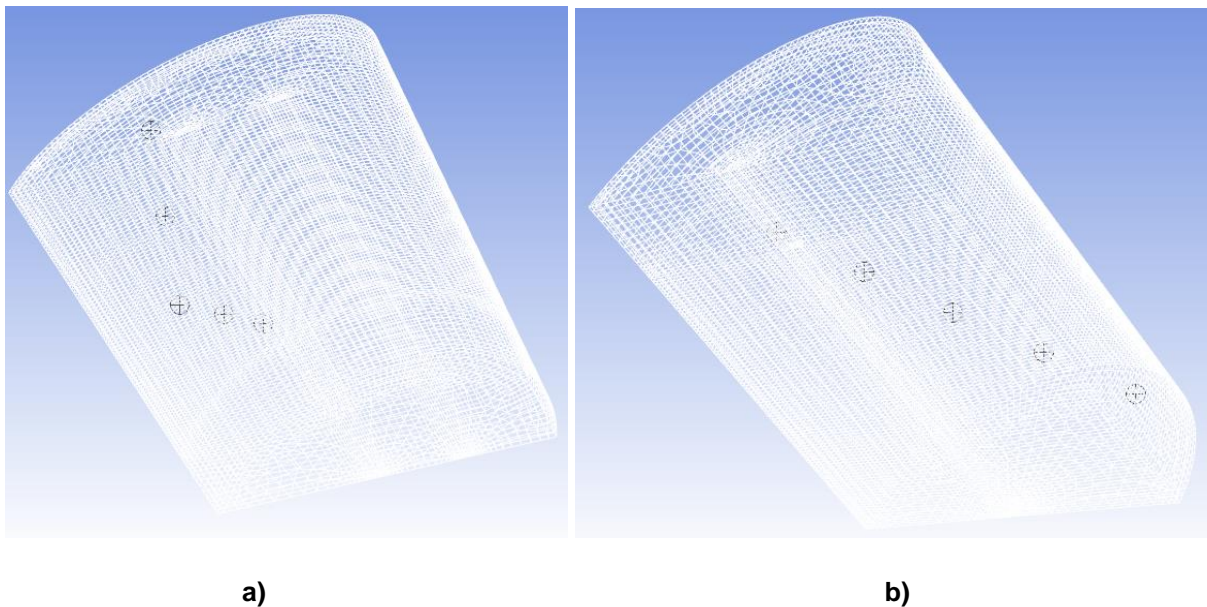


Figura 2.11 Posición de los monitores de temperatura en el modelo matemático. a) Inyección excéntrica, b) Inyección céntrica.

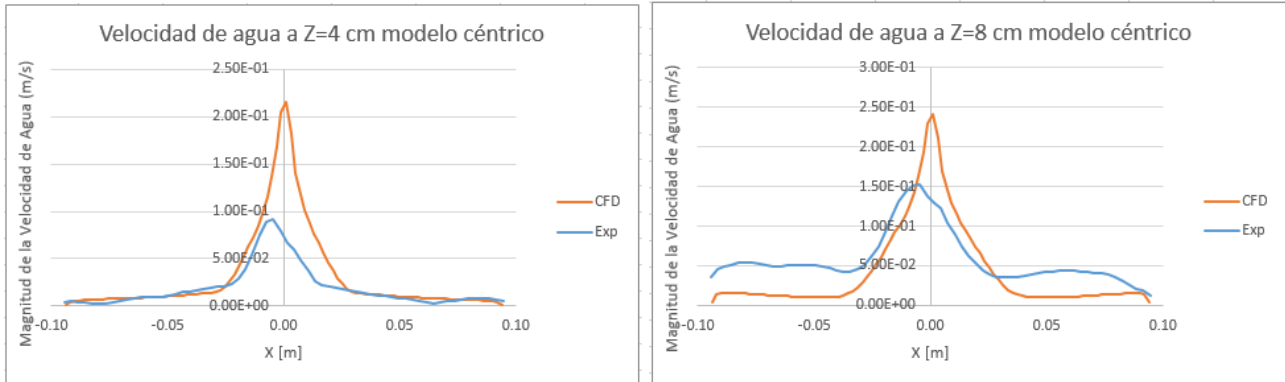
### 3 Resultados y Discusión

#### 3.1 Descripción de resultados

##### 3.1.1 Dinámica de fluidos

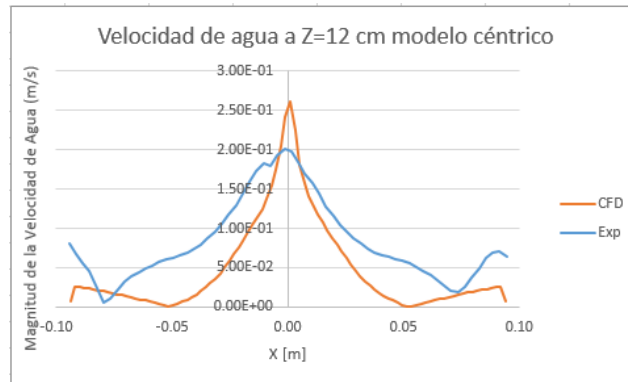
3.1.1.1 Validación de resultados obtenidos del modelo matemático con los obtenidos mediante PIV

##### a) Fluidodinámica con inyección céntrica



a) Posición Z = 4cm

b) Posición Z = 8cm

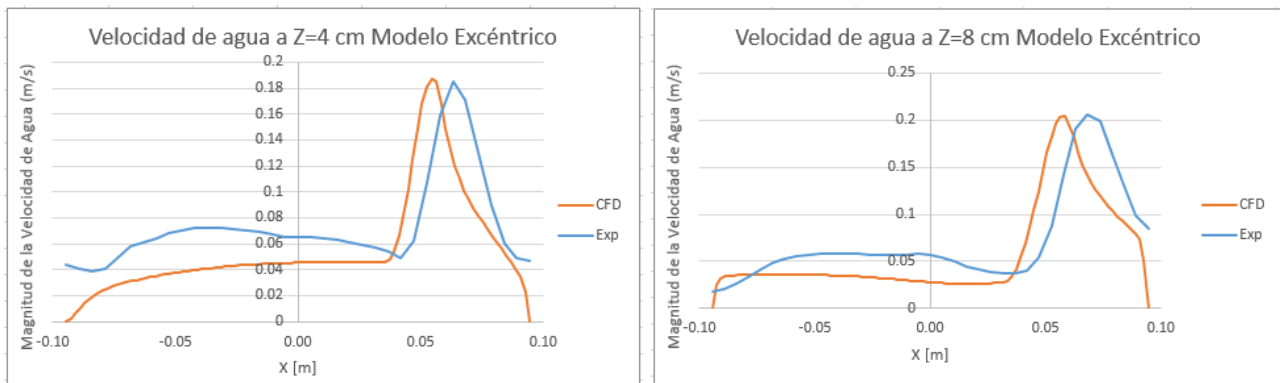


c) Posición Z = 12 cm

Figura 3.1. Comparación del perfil radial de magnitud de velocidad de agua entre CFD y PIV para una posición de inyección de gas axisimétrica. a) Posición axial a 4 cm; b) Posición axial a 8 cm; c) Posición axial a 12cm.

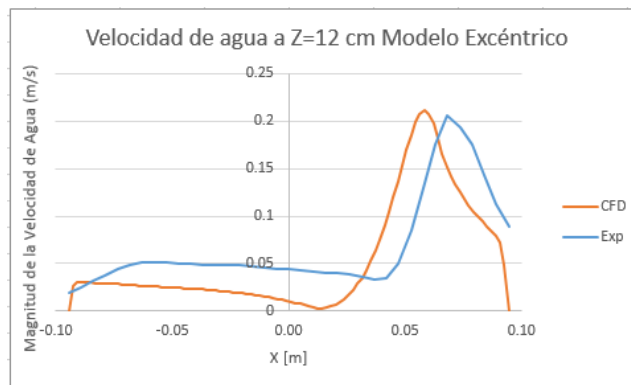
Las Figuras 3.1 a, b y c muestran la comparación de los perfiles radiales (componente X) de la magnitud de la componente Z de la velocidad de agua a 4 cm (Figura 3.1a), 8 cm (Figura 3.1b) y a 12 cm (Figura 3.1c) para la inyección céntrica, entre los resultados experimentales [34] y los obtenidos del modelo matemático propuesto. Se aprecia que conforme la altura en la dirección Z aumenta, las curvas experimental y CFD se asemejan en mayor medida. El orden de magnitud entre las velocidades está en el mismo rango por lo que se puede tomar como una primera validación del modelo matemático. De forma

general se aprecia que a mayor altura en la dirección Z (12cm de la Figura 3.1c) se obtienen resultados más parecidos entre el modelo físico y el modelo matemático. Se puede concluir que el modelo matemático propuesto en la inyección céntrica está validado en cuanto la predicción correcta de las velocidades del líquido y puede ser utilizado para la simulación de fluido dinámica en un Horno Olla.



**a)** Posición Z = 4 cm

**b)** Posición Z = 8 cm



**c)** Posición Z = 12 cm

Figura 3.2 Comparación del perfil radial de magnitud de velocidad de agua entre CFD y PIV para una posición de inyección de gas excéntrica. a) Posición axial a 4 cm; b) Posición axial a 8 cm; Posición axial a 12 cm.

Las Figuras 3.2 a, b y c muestran curvas muy similares de los perfiles radiales de magnitud en la velocidad de agua, tanto predichas con el modelo como las medidas con PIV, para el caso de inyección excéntrica. Se aprecia la formación de la pluma a lo largo de la posición radial (componente X). Las magnitudes de las velocidades obtenidas con la inyección excéntrica son mayores a las obtenidas con la inyección céntrica, por lo que se tiene una mayor convección en el modelo excéntrico, lo cual puede significar un mejor mezclado químico. Finalmente, se puede aseverar que queda validado el modelo excéntrico para la simulación de procesos en el Horno Olla tanto con inyección céntrica como excéntrica.

### 3.1.1.2 Inyección céntrica en el **Plano 2** (ver Figura 2.2).

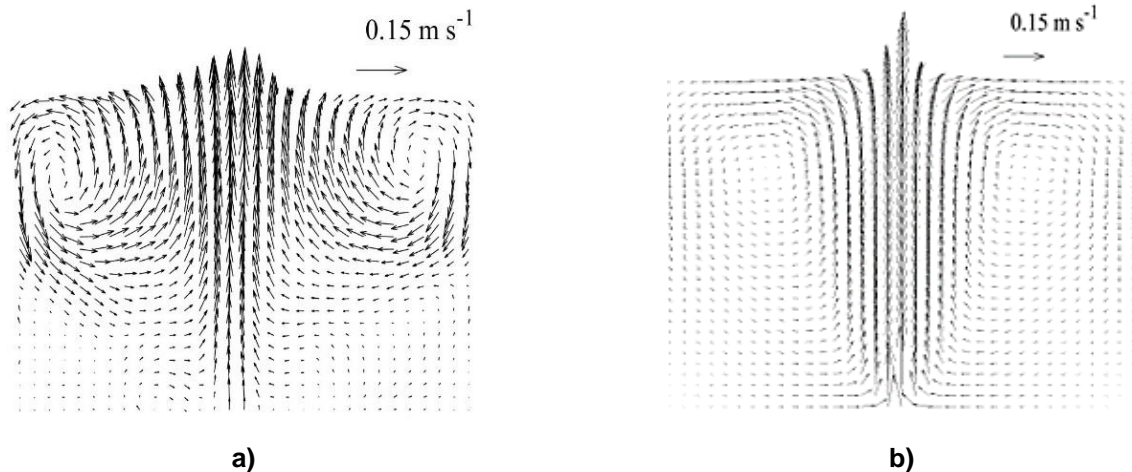


Figura 3.3 Patrón de flujo en el plano 2 en inyección céntrica. a) Experimental, b) predicción con el modelo matemático.

La Figura 3.3 muestra el mapa de vectores de velocidad del líquido medido con PIV en el plano 2 del experimento con inyección céntrica. Se aprecia una buena concordancia entre mediciones (Figura 3.3a) y simulaciones (Figura 3.3b) en cuanto a los patrones de flujo en estado estable que se establece en el líquido en una olla agitada con gas. Se nota tanto en la medición como en la predicción, un movimiento ascendente de fluido en la pluma que al llegar a la superficie libre se desvía radialmente y al llegar a las paredes laterales baja para regresar a la pluma formando dos recirculaciones simétricas en la parte superior de la olla, lo que se conoce como toroides. En el caso del patrón experimental, los toroides se encuentran en una posición más cargada hacia las orillas en comparación con los obtenidos mediante la simulación. En la simulación se aprecia la formación de la pluma desde una zona más baja mientras que en la medición experimental la formación de la pluma se da en una zona más alta. En la parte inferior cerca de las paredes se aprecian zonas de baja velocidad que en la literatura se denominan zonas muertas.

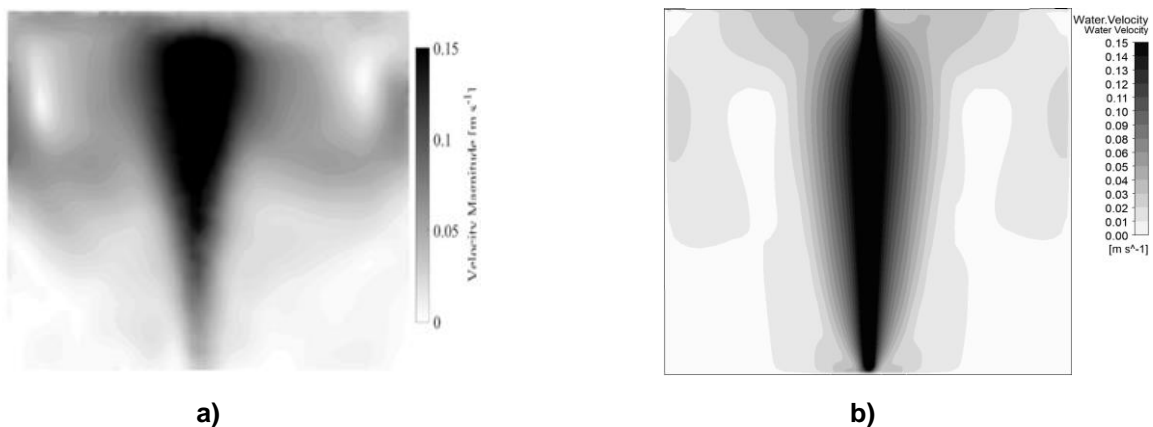


Figura 3.4 Contornos de velocidad de agua en el plano 2 con inyección céntrica. a) Medición experimental PIV, b) predicción con el modelo matemático.

En la Figura 3.4 se muestran los contornos de la magnitud de la velocidad de agua en el plano 2 del experimento con inyección axisimétrica, en donde se tiene una buena concordancia entre los contornos simulados (Figura 3.4b) y los medidos experimentalmente (Figura 3.4a). Las magnitudes de velocidad del líquido tanto para la simulación como para la medición se encuentran en el mismo orden de magnitud, sin embargo, la medición experimental cuenta con una zona mayor con alta velocidad comparado con la simulación. La zona de mayor velocidad se encuentra en el área de la pluma y, en ambos casos, se aprecia que en las zonas de recirculación se mantiene una mayor velocidad. Las paredes laterales muestran zonas de alta velocidad pues es donde el agua choca con la pared produciendo cierta turbulencia, conforme el agua se desliza sobre la pared, esta velocidad va decreciendo por fricción con la pared hasta alcanzar las zonas muertas mostradas en los patrones de flujo, pues en las esquinas inferiores del plano, las velocidades son muy bajas.

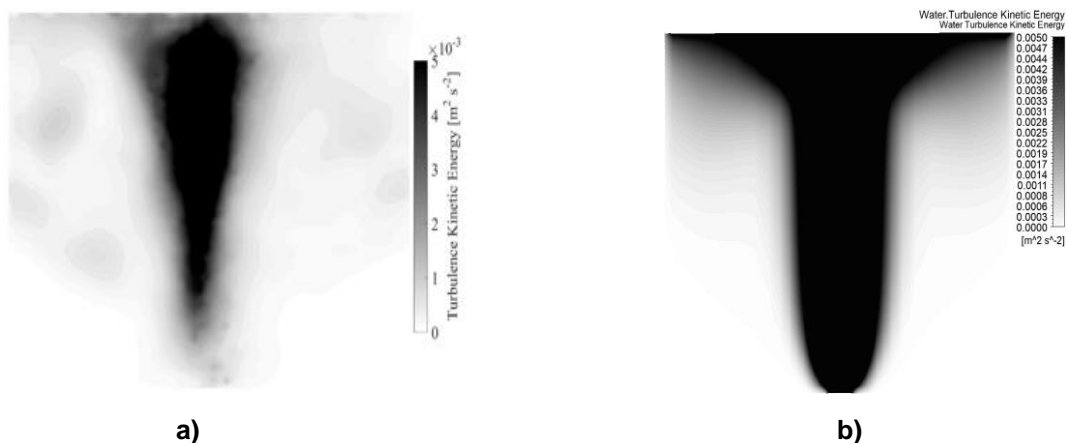


Figura 3.5 Contornos de energía cinética turbulenta de agua en el plano 2 para inyección axisimétrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

La Figura 3.5 muestra la comparación entre los contornos de energía cinética turbulenta del agua medidos (Figura 3.5a) y predichos por el modelo (Figura 3.5b) en el plano 2 para el caso de la inyección axisimétrica. Se aprecia una buena concordancia entre ambos casos, sin embargo, la principal diferencia entre la simulación y la medición experimental radica en que para la zona de la burbuja libre y la burbuja primaria en el caso experimental no se aprecia una elevada magnitud de energía cinética turbulenta, mientras que en la simulación si aparece una zona de alta magnitud de  $k$  en esas zonas. Además, en la zona que rodea a la pluma, para el caso experimental se observa presencia de moderada energía cinética turbulenta mientras que en el caso del modelo matemático ésta se presenta en menor medida. También se puede apreciar que en el caso simulado  $k$  abre hacia los lados

conforme se aumenta en la altura del plano al romperse la pluma, mientras que resultado experimental presenta una abertura de mucho menor tamaño.

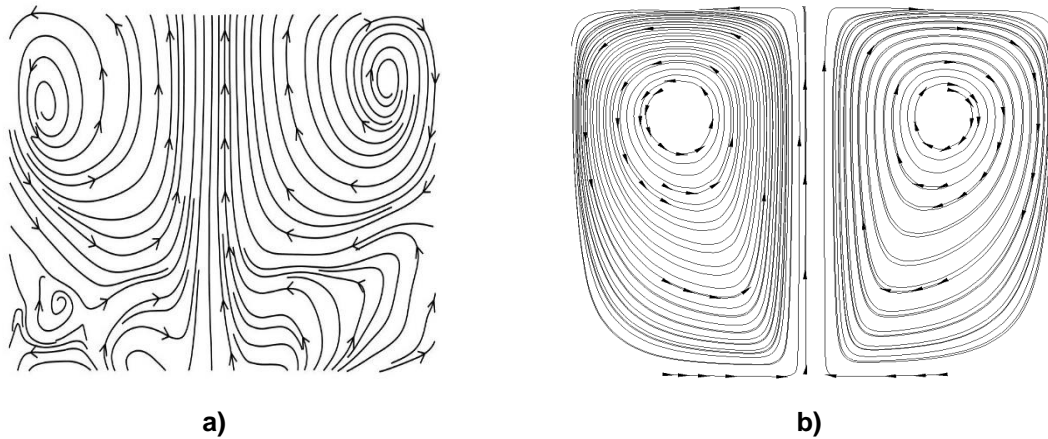


Figura 3.6 Líneas de flujo de agua en el plano 2 para inyección axisimétrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

La Figura 3.6 muestra las líneas de flujo del líquido sobre el plano 2 para la inyección axisimétrica medidas con PIV (Figura 3.6a) y simuladas (Figura 3.6b). De forma general se aprecia que la dirección de la circulación del líquido tanto en la medición experimental como en la simulación numérica es la misma. En cuanto a los toroides formados, se debe mencionar que el modelo matemático únicamente arrojó dos toroides obtenidos de manera simétrica en el plano cargados hacia la zona centro con una altura a 3/4 de la altura total de agua. En cuanto a las zonas muertas, el modelo matemático muestra claramente la parte inferior del plano con este comportamiento, mientras que los resultados del experimento arrojaron también zonas muertas en las esquinas inferiores, además de que los toroides formados por la recirculación del agua se ubican en las esquinas superiores, muy hacia las orillas del plano de medición.

### 3.1.1.3 Inyección céntrica en el **Plano 3** (ver Figura 2.2).

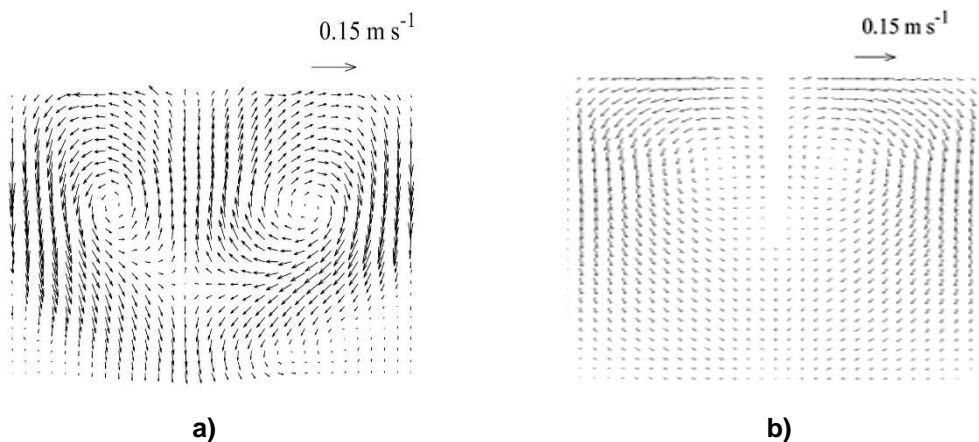


Figura 3.7 Patrón de flujo de agua en el plano 3 para inyección axisimétrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.



En la Figura 3.7 se muestran los patrones de flujo del agua en el plano 3 para la inyección axisimétrica medidos con PIV (Figura 3.7a) y calculados (Figura 3.7b). Se aprecia una gran semejanza entre los resultados obtenidos de los patrones de flujo de agua mediante la simulación y los resultados de PIV. Los dos toroides formados se ubican en la parte central del plano de medición, sin embargo, los toroides provenientes de la simulación tienen una menor magnitud y están ubicados en una parte más alta del plano, comparado con los experimentales. El mapa de vectores simulado muestra vectores de menor magnitud de la velocidad del agua y una mayor simetría en el patrón de flujo que los resultados medidos experimentalmente. Las paredes laterales tanto en las mediciones en el modelo físico como en las predicciones del matemático parecen tener los vectores de velocidad de mayor magnitud. Debido a la condición de no deslizamiento, el líquido pierde velocidad ocasionando la formación de las zonas muertas en las esquinas inferiores del plano.

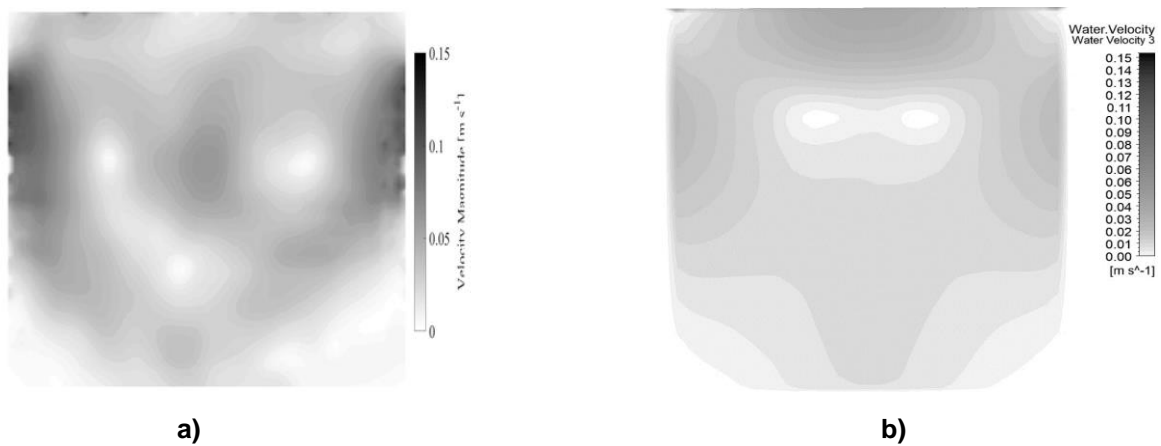


Figura 3.8 Contornos de magnitud de la velocidad de agua en el plano 3 con inyección céntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

La Figura 3.8 muestra los contornos de la velocidad de agua en el plano 3 para el experimento axisimétrico obtenida mediante PIV (Figura 3.8a) y simulación numérica (Figura 3.8b). En cuanto al orden de magnitud de la velocidad de agua, se aprecia que ambos contornos (medidos y simulados) presentan el mismo orden de magnitud y, de acuerdo a la escala blanco y negro, se tienen velocidades bastante similares con una ligera mayor velocidad en la zona central del plano experimental comparado con el simulado. Nuevamente, ambos contornos permiten observar que las paredes laterales de la parte alta del horno son las que presentan mayor magnitud de la velocidad del líquido, mientras que las esquinas inferiores son las de menor velocidad. El centro de los dos toroides muestra una zona de baja magnitud de la velocidad del líquido, donde se encuentran los ojos de la recirculación. En cuanto a la semejanza entre resultados, es complicado obtener un

contorno por la vía de la simulación que se asemeje al presentado por el PIV debido a que se trata de un plano con baja velocidad, es decir, es un plano alejado de la pluma.

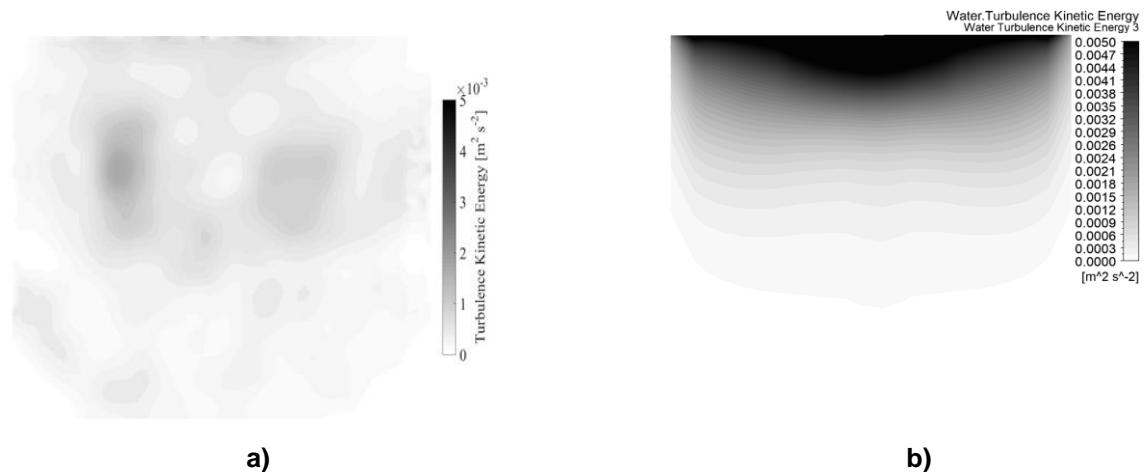


Figura 3.9 Contornos de energía Cinética Turbulenta de agua en el plano 3 con inyección céntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

La Figura 3.9 proporciona los contornos de energía cinética turbulenta del líquido en el plano 3 de la inyección axisimétrica medidos con PIV (Figura 3.9a) y simulados (Figura 3.9b). Es aún más complicado distinguir una buena semejanza entre simulación y medición ya que en el caso de la simulación únicamente se aprecia la presencia de esta variable en la parte superior del plano, esto proveniente de la ruptura de la pluma en el final de la fase agua mientras que en (a) se aprecia una distribución heterogénea de esta energía. De forma general se confirma la presencia de las zonas muertas en las esquinas inferiores y la aparición de la energía cinética turbulenta en las regiones donde se forman los toroides.

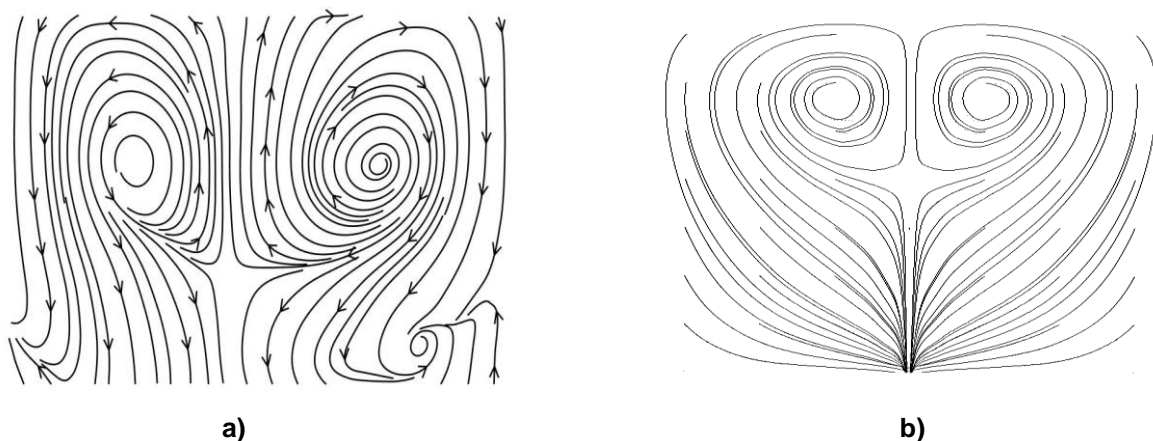


Figura 3.10 Líneas de flujo de agua en el plano 3 para inyección axisimétrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

En la Figura 3.10 se aprecian las líneas de flujo del líquido sobre el plano 3 para el experimento de inyección axisimétrico medidas con PIV (Figura 3.10a) y calculadas (Figura 3.10b). Es posible observar una muy buena similitud entre los resultados experimentales y

simulados. Se observa la presencia de dos recirculaciones en la parte central del plano con lo que se comprueba que la zona de la pluma tiene la mayor velocidad y al llegar a la superficie libre, el agua se dirige hacia las paredes del modelo donde al chocar se mueve hacia la parte baja de la olla y con esto vuelve a ser arrastrada por la inyección de aire, creando una recirculación. Nuevamente, una de las principales diferencias entre PIV y CFD es la posición de los toroides formados; en CFD éstos tienen una inclinación por la parte superior de la olla mientras que en PIV se encuentran en la parte central. Además, en los resultados experimentales se aprecia la formación de dos pequeñas recirculaciones en las esquinas inferiores mientras que en CFD, estas recirculaciones no aparecen y todo se aprecia como zona muerta.

#### 3.1.1.4 Inyección excéntrica en el **Plano 1** (ver Figura 2.2)

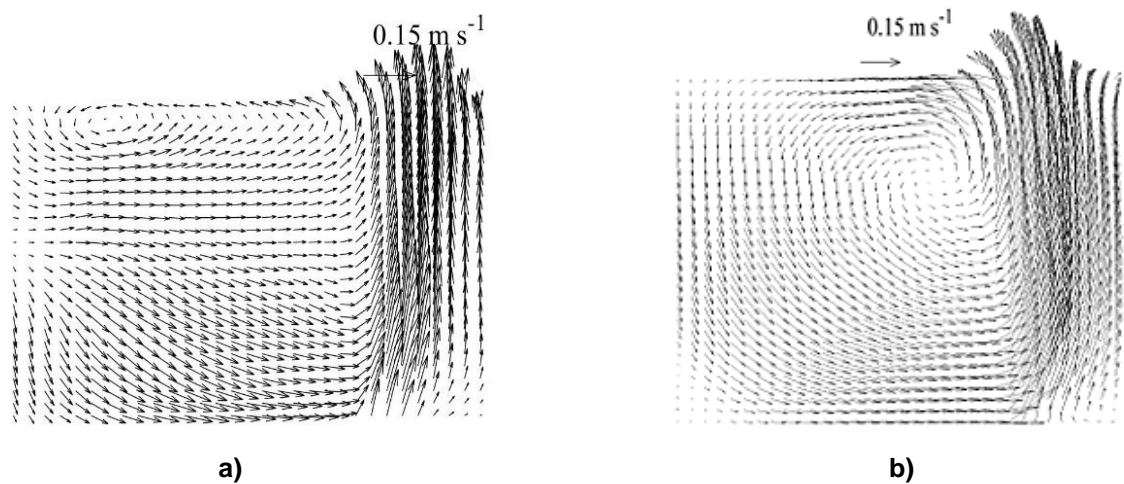


Figura 3.11 Patrón de flujo de líquido en el plano 1 con inyección excéntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

La Figura 3.11 muestra el mapa de vectores de velocidad del líquido en el plano 1 para el caso con inyección excéntrica medido con PIV (Figura 3.11a) y simulado (Figura 3.11b). Se aprecia una buena concordancia entre los resultados simulados y los obtenidos mediante PIV. Se nota tanto en la medición como en la predicción, un movimiento ascendente del fluido en la pluma que al llegar a la superficie libre se desvía radialmente. En el caso de las simulaciones esta desviación se da hacia la izquierda de manera más marcada mientras que en las mediciones se aprecia más cargado hacia la derecha. Una vez que el fluido se transporta a través de la superficie hacia la izquierda, éste choca con la pared en esa dirección y al momento de bajar va perdiendo velocidad hasta que es nuevamente arrastrado por la pluma de aire formando la recirculación. Debido a la posición excéntrica de la inyección de gas, solo se forma un toroide en ambos contornos, pero para el caso de la simulación este se forma justamente de lado izquierdo de la pluma mientras que en los

resultados experimentales la recirculación se forma justo debajo de la superficie libre, a la izquierda del plano de medición. Para ambos casos se aprecia que se eliminan las zonas muertas, por lo que se puede decir que con la inyección de gas excéntrica se tendrá un mejor mezclado químico comparado con el mezclado químico que se pudiese obtener con la inyección de gas céntrica.

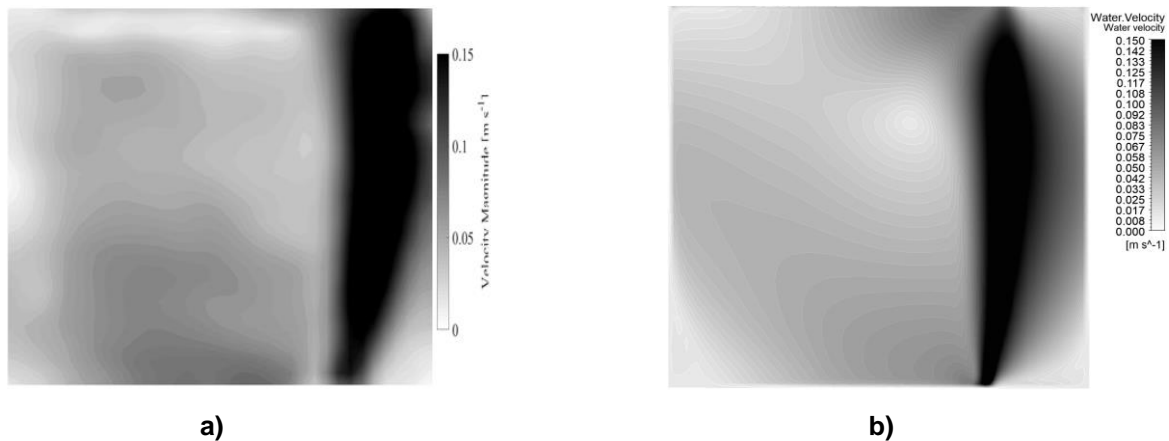


Figura 3.12 Contornos de velocidad de agua en el plano 1 en el experimento con inyección excéntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

En la Figura 3.12 se observa el contorno de la velocidad de agua medida en el plano 1 para el caso de inyección de gas excéntrica obtenido con PIV (Figura 3.12a) y simulado en ANSYS FLUENT® (Figura 3.12b), en donde es posible notar que la mayor velocidad del agua tanto para el resultado experimental como para la simulación se encuentra en la zona de la pluma. Se aprecia una gran semejanza entre ambos contornos tanto en la distribución de la velocidad como en el orden de magnitud del valor de velocidad de agua. Se confirma la disminución de zonas de baja velocidad en las esquinas inferiores para el modelo físico, pero para el caso del modelo matemático se aprecia que aparentemente se mantuvo una zona de baja velocidad en la esquina inferior izquierda.

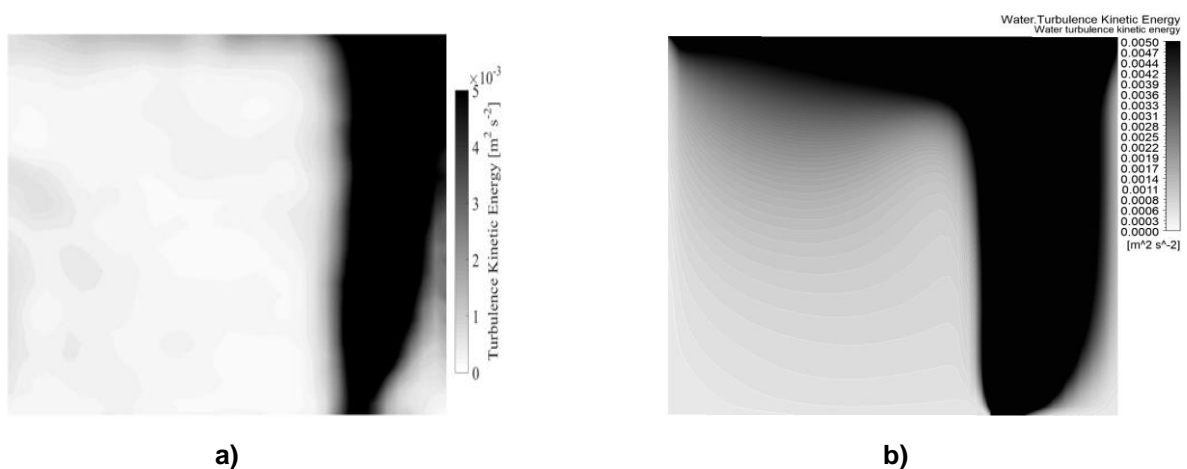


Figura 3.13 Contornos de energía cinética turbulenta de agua en el plano 1 con la inyección excéntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

La Figura 3.13 muestra el contorno de la energía cinética turbulenta obtenida en el plano 1 para el caso de inyección excéntrica medida (Figura 3.13a) y predicha (Figura 3.13b). De forma general se tiene una buena similitud entre mediciones con PIV y simulaciones con CFD de  $k$ , pues la pluma es donde se acumula la mayor energía cinética turbulenta. Tanto para la simulación como en PIV es posible apreciar que la mayor  $k$  se ubica en la zona de la pluma. Sin embargo, en el caso de PIV  $k$  se distribuye completamente hacia la derecha sin abrir cuando la pluma rompe, mientras que en CFD  $k$  abre hacia la izquierda. Finalmente, de acuerdo a la escala blanco y negro, el contorno simulado muestra una buena cantidad de energía cinética turbulenta inclusive en la zona izquierda del plano, caso contrario para el resultado obtenido por PIV pues éste muestra zonas blancas lo cual se atribuye a una baja  $k$ .

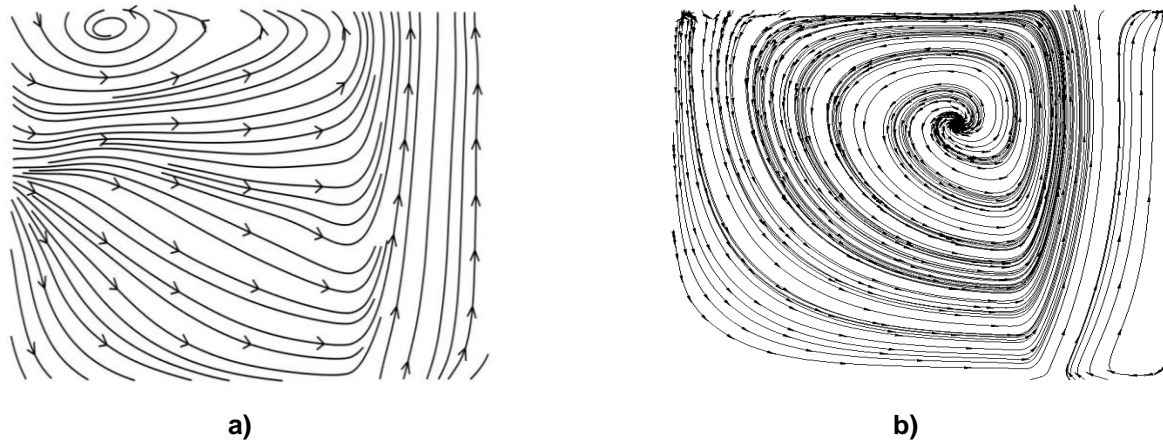


Figura 3.14 Líneas de flujo de agua en el plano 1 para inyección excéntrica. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con un modelo matemático.

Con la Figura 3.14 se pueden apreciar las líneas de flujo del agua en el plano 1 para la inyección excéntrica medidas (Figura 3.14a) y simuladas (Figura 3.14b). Se aprecia una buena concordancia entre simulación y medición para las líneas de flujo obtenidas en la orilla derecha. En ambos resultados (medidos y simulados) se tienen la misma dirección de flujo, pero la zona de formación del toroide es diferente. En la simulación, la recirculación se formó justo en la orilla de la zona de la pluma mientras que en las mediciones su formación se da muy cerca de la esquina superior izquierda. Además, se comprueba la presencia de una zona muerta en la esquina inferior izquierda del plano de medición, esto debido a que no se presentan líneas de flujo en el caso simulado y las presentes en el resultado experimental son de un tamaño pequeño.

### 3.1.1.5 Inyección excéntrica en el **Plano 2** (ver Figura 2.2)

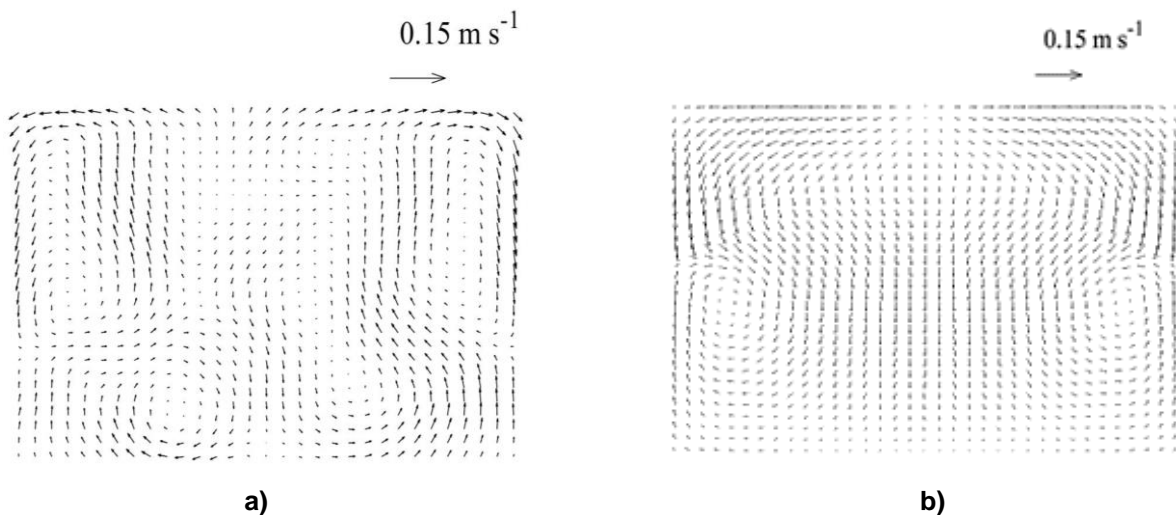


Figura 3.15 Patrón de flujo en el plano 2 para el experimento excéntrico. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

En la Figura 3.15 es posible observar los mapas de vectores de velocidad presentes en el plano 2 para la inyección excéntrica medidos (Figura 3.15a) y simulados (Figura 3.15b). De manera general se aprecia una buena concordancia entre los resultados experimental y simulado pues las principales recirculaciones se encuentran en las orillas y a la altura de la mitad del plano. A pesar de la distancia del plano 2 con respecto al plano de inyección de gas, se comprueba que esta inyección excéntrica mueve al fluido de forma ascendente y una vez que se llega a la superficie el fluido pasa de tener un movimiento axial a uno radial desviándose hacia las orillas del plano donde nuevamente es arrastrado por la pluma generando la recirculación. Los resultados obtenidos por PIV muestran la formación de una mayor cantidad de recirculaciones mientras que el plano simulado únicamente presenta 3, considerando un ligero toroide formado en la parte central y superior del plano. Se confirma las zonas de alta velocidad en las orillas del plano.

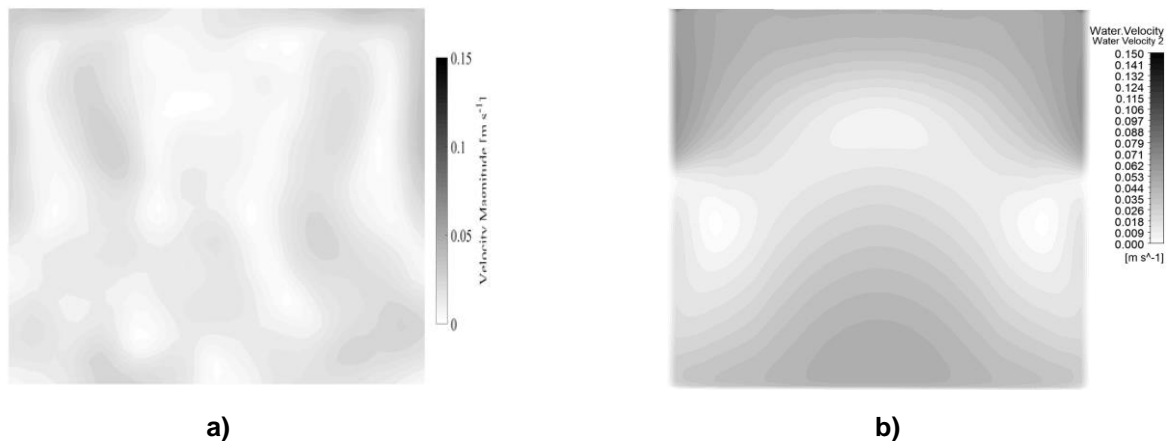


Figura 3.16 Contornos de velocidad de agua en el plano 2 para el experimento excéntrico. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

La Figura 3.16 muestra el contorno de velocidad de agua medido en el plano 2 para la inyección excéntrica medidas con PIV (Figura 3.16a) y simuladas (Figura 3.16b). En este caso no se aprecia una concordancia buena entre la simulación y la experimentación, ya que este plano se ubica en una zona de baja velocidad debido a la gran distancia a la que se encuentra de la inyección del gas. En cuanto a las magnitudes de la velocidad de agua, se aprecia un mismo orden de magnitud para ambos casos por lo que en cuanto a esta variable, se tiene una buena similitud entre los resultados medidos y predichos. Debido a la escala de grises, se puede observar que el plano simulado presenta una mayor velocidad de agua y también una mejor distribución de la misma comparado con el experimental.

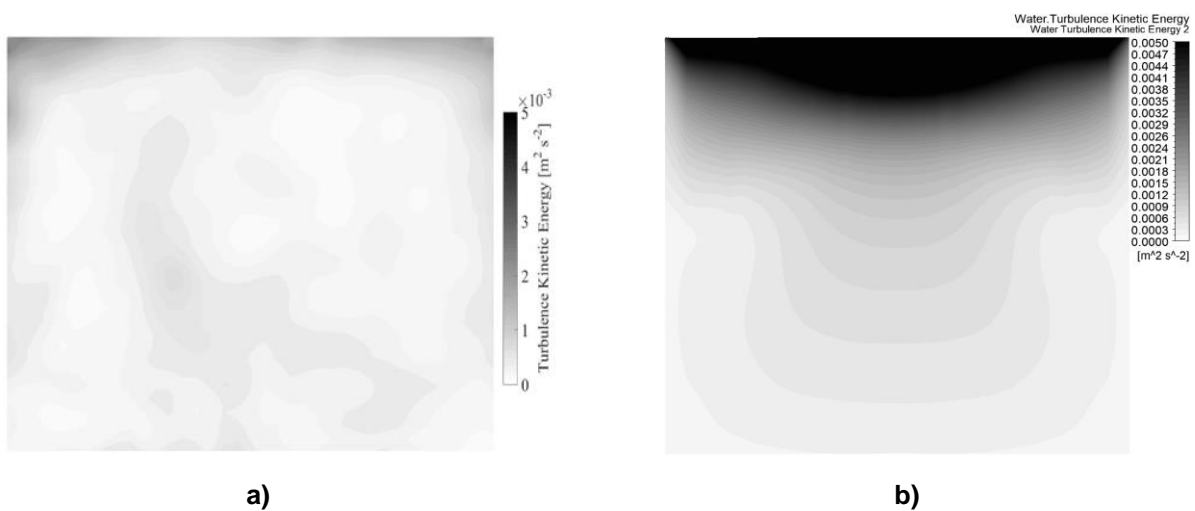


Figura 3.17 Contornos de energía cinética turbulenta de agua en el plano 2 con el experimento excéntrico. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

Para el caso de los contornos de energía cinética turbulenta del agua mostrados en la Figura 3.17 ocurre algo similar que en la Figura 3.16, es decir, es difícil encontrar una buena semejanza entre simulaciones y mediciones en estos planos, debido a la gran distancia del plano 2 respecto al plano de la inyección del gas. Las zonas superiores del plano son las que muestran la mayor cantidad de energía cinética turbulenta pues es aquí donde la pluma adquiere la mayor  $k$ . También es posible apreciar que la simulación arrojó un plano con una mayor cantidad de energía cinética turbulenta comparado con el caso experimental. Finalmente, tanto el plano experimental como la simulación muestra gradientes de energía cinética turbulenta.

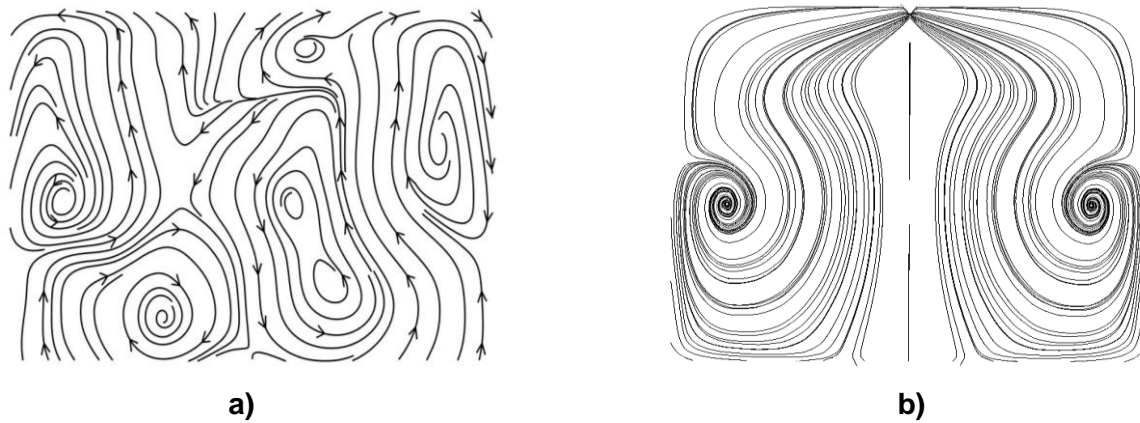


Figura 3.18 Líneas de flujo en el plano 2 para el experimento excéntrico. a) Medición experimental con PIV, b) Predicción con el modelo matemático.

En la Figura 3.18 se observan las líneas de flujo del agua en el plano 2 para la inyección excéntrica medidas con PIV (Figura 3.18a) y simuladas (Figura 3.18b). Existe una mala concordancia entre mediciones y simulaciones, pues solo se aprecia la formación de dos toroides en el modelo matemático mientras que se aprecia la formación de 6 toroides en la medición experimental. De nuevo, son planos secundarios de flujo alejados del plano de inyección donde se encuentra el flujo principal. Además, la posición de las recirculaciones y sus ojos, así como las líneas de flujo difiere entre mediciones y simulaciones.

### 3.1.2 Resultados de conservación de energía

#### 3.1.2.1 PLIF Térmico

##### 3.1.2.1.1 Inyección céntrica

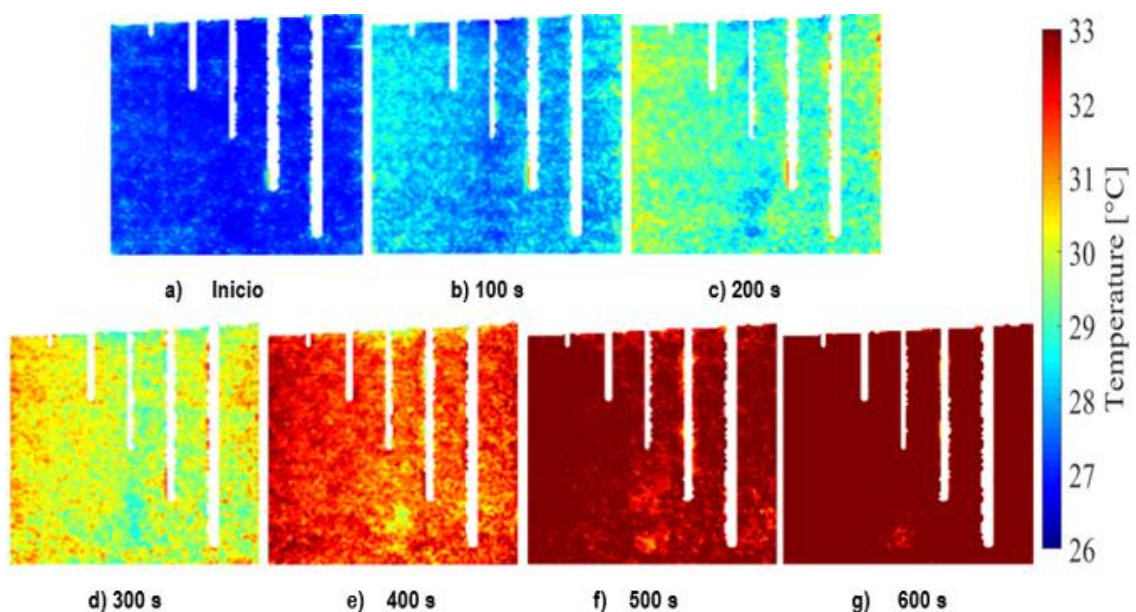


Figura 3.19 Contornos de temperatura del agua en el plano 3, medidos con la implementación de la técnica PLIF térmico para inyección de gas céntrica a diferentes tiempos. a) inicio, b) 100 s, c) 200 s, d) 300 s, e) 400 s, f) 500 s, g) 600 s.



En la Figura 3.19 se pueden apreciar los resultados de la evolución térmica para la inyección céntrica obtenidos mediante la técnica PLIF Térmico a distintos tiempos en el plano 3. De forma general se aprecia un aumento de la temperatura conforme el tiempo transcurre iniciando con el azul marino para la temperatura más fría (Temperatura ambiente), pasando por azul cielo, verde agua, amarillo, naranja, rojo y finalmente rojo pálido para la temperatura más alta (33°C). Se observa que no existe una homogeneidad completa en cuanto a los colores de los contornos, todos presentan una polarización en los píxeles que componen el plano de visión, por ejemplo, en el contorno obtenido a 200 segundos se aprecia un color verde agua con trazos de amarillo y azul marino. Inclusive, las Figuras 3.19a y 3.19g, a pesar de tratarse de los pasos de tiempo inicial y final, existe la presencia de trazos de otros colores más claros en ambos casos. Además, se aprecia que del lado izquierdo para los contornos de las Figura 3.19d y 3.19e hay cierta cantidad de píxeles con la tonalidad de la temperatura inmediatamente superior teniendo como resultado dos coloraciones principales en cada contorno. Mientras que en el contorno de la Figura 3.19f, este cambio de tonalidad se da en la zona derecha del plano de medición.

### 3.1.2.1.2 Inyección excéntrica

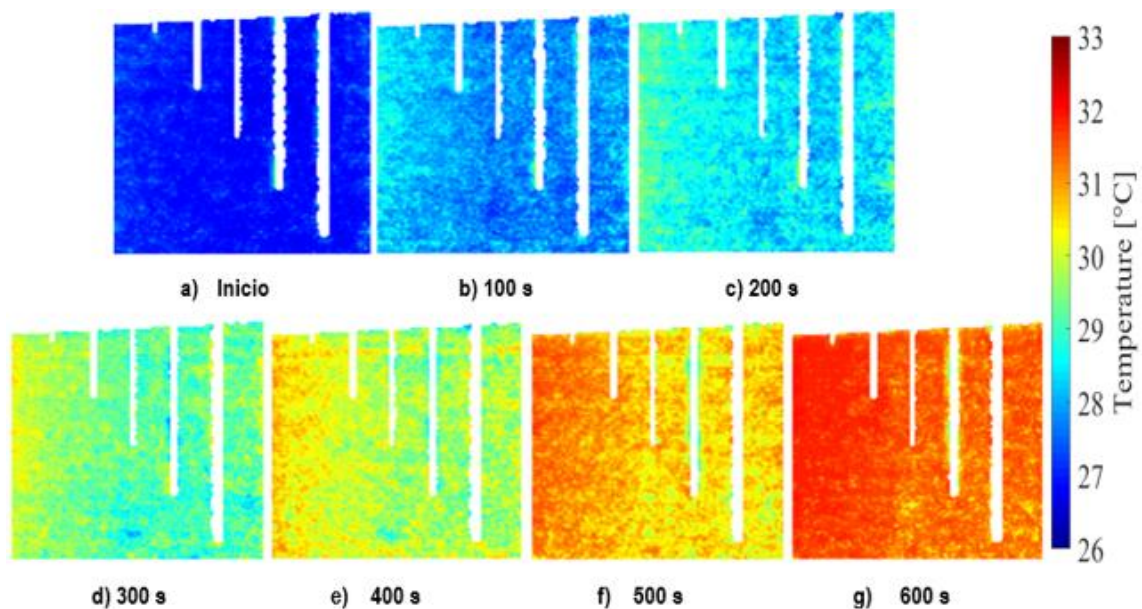


Figura 3.20 Contornos de temperatura del agua en el plano 3, medidos con la implementación de la técnica PLIF térmico para inyección de gas excéntrica a diferentes tiempos. a) inicio, b) 100 s, c) 200 s, d) 300 s, e) 400 s, f) 500 s, g) 600 s.

La Figura 3.20 muestra los resultados de los contornos de temperatura a distintos tiempos obtenidos de la técnica PLIF Térmico implementada para una inyección de gas excéntrica.

Se aprecia que el tono azul marino corresponde a la temperatura más fría (26°C) mientras que el color naranja corresponde a la mayor temperatura (31°C). Con respecto a la Figura 3.19, en la Figura 3.20 se tiene una temperatura máxima menor pues no se alcanzó la tonalidad roja. En todos los contornos se aprecia una heterogeneidad en las tonalidades. Comparado con la Figura 3.19, para los contornos de las Figuras 3.20b a 3.20g, el perfil de color de mayor temperatura a la izquierda del plano en la inyección excéntrica tiene mayor prominencia que en el caso de la inyección céntrica, es decir, se aprecia un mayor gradiente de temperatura en el plano de medición. De lo anterior se puede concluir que se tiene un menor calentamiento con inyección de gas excéntrica que con céntrica.

### 3.1.2.2 Resultados modelo matemático

#### 3.1.2.2.1 Inyección axisimétrica

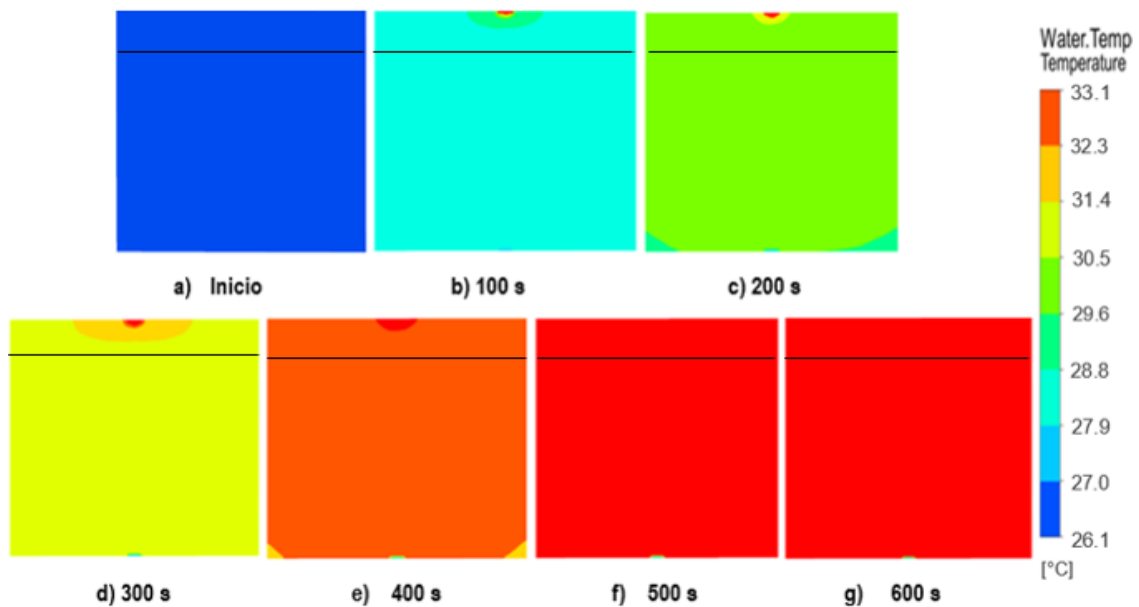


Figura 3.21 Contornos de temperatura del agua en el plano 3, predichos con el modelo numérico para una inyección de gas axisimétrica a diferentes tiempos. a) inicio, b) 100 s, c) 200 s, d) 300 s, e) 400 s, f) 500 s, g) 600 s.

En la Figura 3.21 se aprecian los contornos de temperatura obtenidos a diferentes tiempos mediante el modelo matemático con inyección de gas céntrica. Se aprecia una homogeneidad de temperatura en prácticamente todos los planos simulados, el rango de colores va de azul marino hasta rojo pasando por azul cielo, verde, amarillo y naranja. Se debe poner especial atención en los contornos de las Figuras 3.21c y 3.21e, en los cuales es posible apreciar una ligera variación en la tonalidad de la parte inferior del plano de medición, la línea negra muestra el enmascaramiento que se realizó al modelo físico. Por tanto, a pesar de existir un flux de calor en la parte superior del modelo físico, lo que provoca

una zona con mayor temperatura al resto del volumen más o menos homogéneo, esta zona puede despreciarse. En el caso de los contornos de las Figuras 3.21c, 3.21d, 3.21e y 3.21f, en donde la parte inferior del plano más claro corresponde a la inyección de aire, por supuesto a una temperatura muy cercana a la ambiente. Además, los contornos de las Figuras 3.21f y 3.21g muestran la misma coloración, por lo que la temperatura a partir de 500 segundos permaneció constante en el modelo numérico.

### 3.1.2.2 Inyección excéntrica

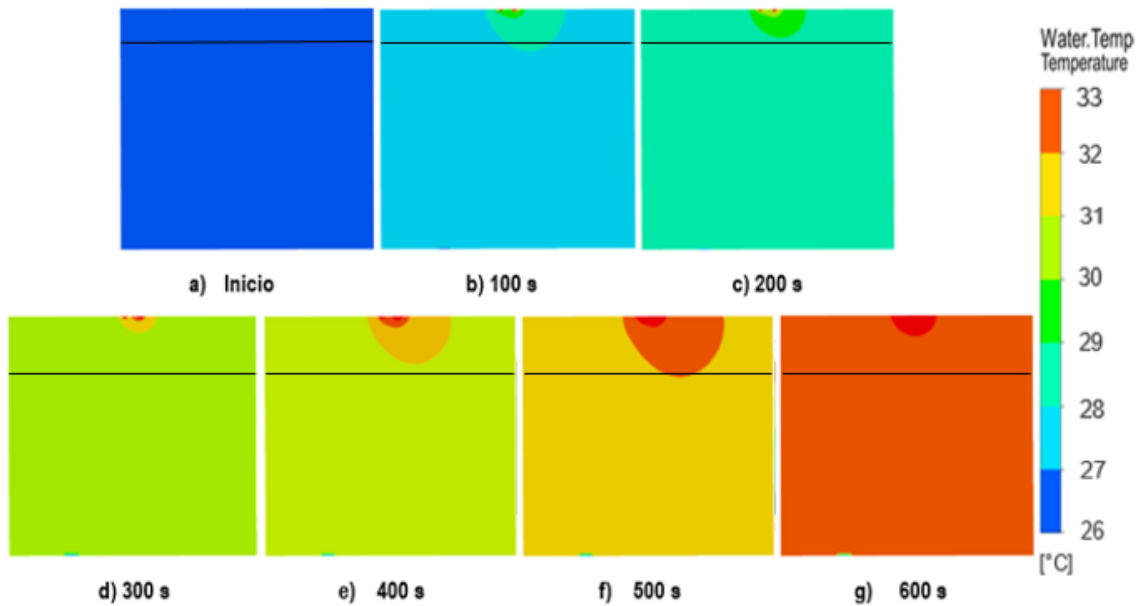


Figura 3.22 Contornos de temperatura del agua en el plano 3, predichos con el modelo numérico para una inyección de gas excéntrica a diferentes tiempos. a) inicio, b) 100 s, c) 200 s, d) 300 s, e) 400 s, f) 500 s, g) 600 s.

Para el caso de la Figura 3.22 se pueden observar los contornos de temperatura obtenidos a diferentes tiempos mediante el modelado numérico con inyección de gas excéntrica. La línea inferior izquierda que se aprecia en los contornos de coloración azul claro corresponde a la inyección de gas, por lo que puede ser ignorada del análisis en todos los casos. Análogamente, la parte superior del contorno puede ser despreciada del análisis pues es donde se ubica la fuente de energía (Flux suministrado). Por tanto, se aprecia un contorno de temperatura homogéneo en todos los casos donde la temperatura más fría corresponde al color azul marino mientras que la temperatura más alta la da la tonalidad naranja pasando por los colores azul cielo, verde agua, verde, verde cartuja y amarillo. A diferencia de la inyección céntrica, en este caso la temperatura no permaneció constante a partir de los 500 segundos si no que evolucionó hasta los 600 segundos, aunque la magnitud de la temperatura al final de los 10 minutos de calentamiento es menor con la inyección excéntrica respecto a la céntrica.

### 3.1.3 Comparación de la evolución térmica entre modelo físico y numérico

#### 3.2.3.1 Inyección axisimétrica

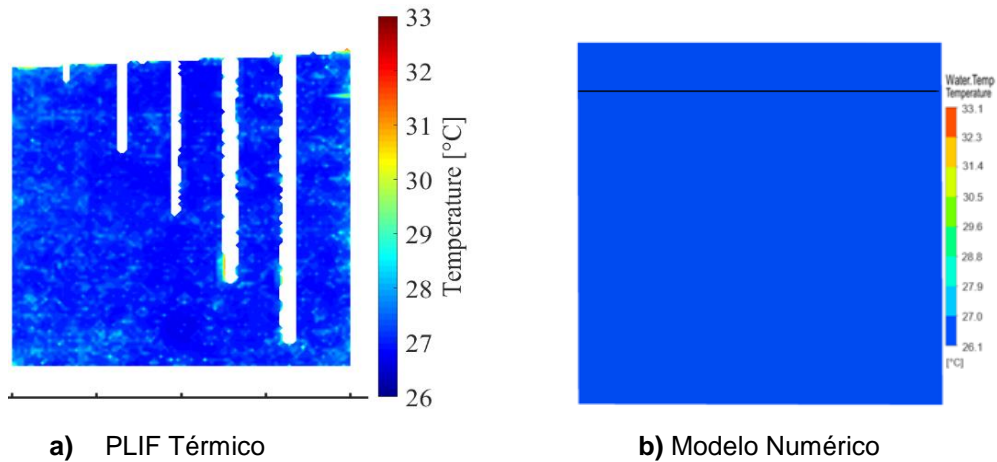


Figura 3.23 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 000 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

La Figura 3.23 muestra el contorno de temperatura obtenido al inicio de la simulación (3.23b) y experimento (3.23a) para la inyección de gas axisimétrica. En el caso del experimento es posible apreciar un fondo azul marino correspondiente a una temperatura de 26 °C con pixeles coloreados de tonalidad azul cielo, los cuales presentan una temperatura de entre 28 y 29 °C. Se observan ciertas líneas de ruido en la zona superior derecha del plano de medición. En cuanto a los contornos simulados (3.23b) se muestra un contorno completamente homogéneo correspondiente a 26 °C sin presencia de otras coloraciones. Se tiene una buena concordancia entre los contornos de temperatura predichos por el modelo numérico y los medidos experimentalmente.

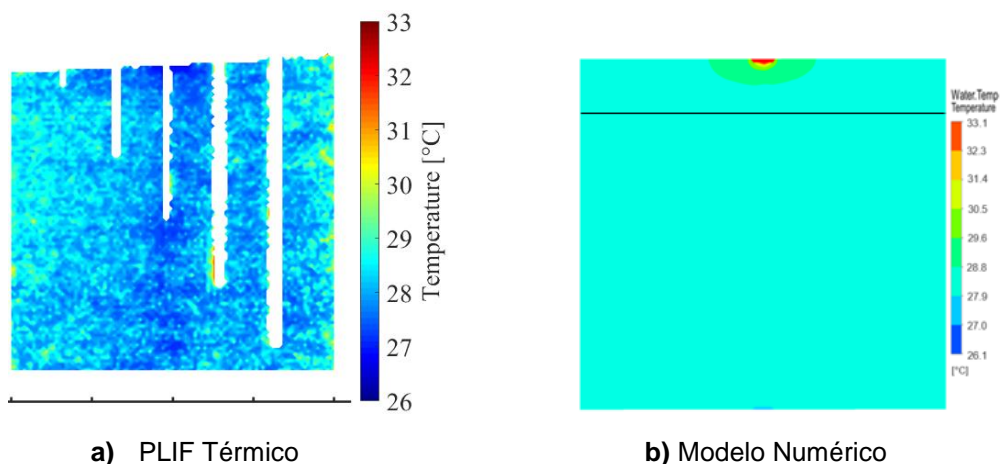


Figura 3.24 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 100 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.24 se observan los resultados de los contornos de temperatura obtenidos de la técnica PLIF Térmico (3.24a) y simulación numérica (3.24b) a un tiempo de 100 segundos

con una inyección céntrica. Para el resultado experimental, se ve que existe una predominancia de tonalidad azul cielo en los extremos del contorno mientras que en la parte central se tiene una tonalidad azul marino, esto aunado a pequeños pixeles coloreados de amarillo en la parte superior izquierda del plano de medición. Por parte del modelo matemático se tiene únicamente una coloración azul cielo homogénea en todo el contorno mientras que en la parte superior solo aparece la influencia del Flux colocado para el calentamiento del fluido. A pesar de la heterogeneidad observada en el resultado experimental la predominancia de la tonalidad azul cielo da lugar a una buena concordancia con el resultado obtenido del modelo matemático.

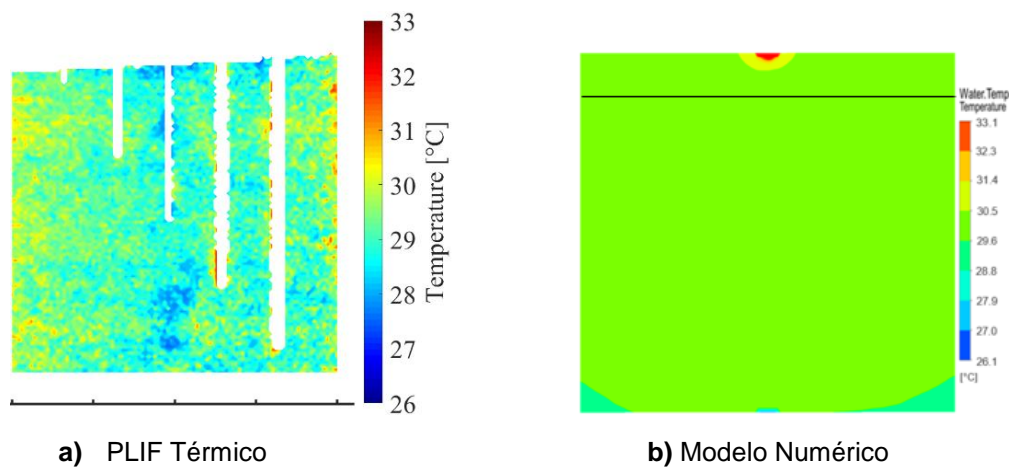


Figura 3.25 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 200 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

Con respecto a la Figura 3.25, se tienen los contornos de temperatura obtenidos de la técnica PLIF Térmico (3.25a) y simulación (3.25b) a un tiempo de 200 segundos con una inyección axisimétrica. Para el caso experimental es posible observar una mezcla de tonalidades entre amarillo y azul lo cual da paso a un color cercano a verde en la zona central del contorno, mientras que la zona izquierda muestra una mayor predominancia de tonalidad amarilla y en la parte derecha inclusive aparecen pixeles rojos de una aparente mayor temperatura. También se debe mencionar que en la parte central inferior aún existe la presencia de color azul marino, por lo que prácticamente se tiene una mezcla de todas las temperaturas. Posteriormente, el modelo numérico muestra una heterogeneidad en el contorno obtenido ya que se aprecia en las esquinas de la parte inferior una temperatura más fría (tonalidad verde agua) comparada con el plano completo medido. Asimismo, el círculo rojo en la parte superior corresponde al flux suministrado al sistema. En este caso, la concordancia entre modelo numérico y físico se sigue conservando de manera global a pesar de la variación entre tonalidades.

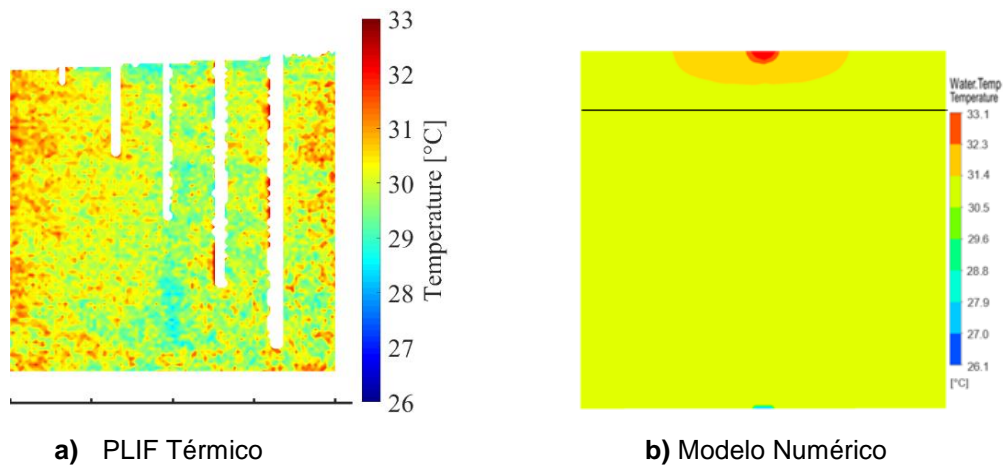


Figura 3.26 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 300 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

La Figura 3.26 muestra los resultados de los contornos de temperatura en el plano 3 generados por la técnica PLIF Térmico (3.26a) y por el modelo matemático (3.26b) a un tiempo de 300 segundos con una inyección céntrica. El contorno medido muestra una predominancia de tonalidad amarilla, eso representa una temperatura de entre 30 y 31 °C. En la zona izquierda y derecha del plano es posible apreciar clusters de color rojo con una temperatura de alrededor de 32 °C mientras que en la parte central del contorno existe la presencia de color verde agua representando una temperatura menor. Para el caso del contorno simulado se tiene un plano con una línea verde agua al fondo correspondiente a la inyección de aire y en la parte superior un círculo rojo, siendo éste el flux aplicado en el sistema. La línea negra indica el enmascaramiento correspondiente al modelo físico. Dicho lo anterior se tiene una distribución de temperatura homogénea en el contorno. Por tanto, la concordancia entre el resultado del modelo físico y el matemático se considera buena.

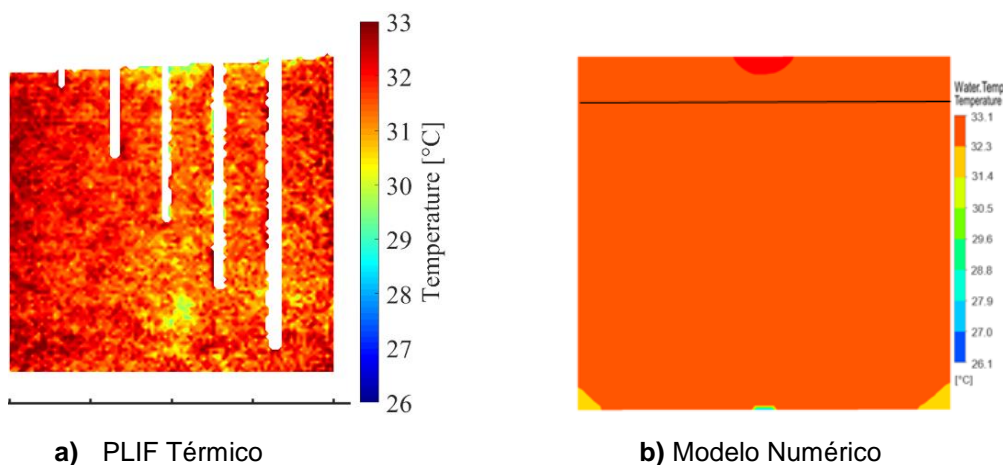


Figura 3.27 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 400 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.27 se aprecian los resultados de los contornos de temperatura en el plano 3 obtenidos de la aplicación de la técnica PLIF térmico (3.27a) y del modelo numérico (3.27b)

a un tiempo de 400 segundos para una inyección de gas céntrica. En el resultado experimental se aprecia una predominancia de tonalidad naranja en todo el plano de medición con los extremos izquierdo y derecho en presencia de coloración más oscura mientras que en la parte central inferior se tiene un color amarillo, por tanto, el rango de temperatura a ese tiempo es de entre 30 y 33°C. En cuanto al resultado obtenido de la simulación se observa que en los extremos izquierdo y derecho de la parte inferior existe la presencia de zonas frías en el modelo pues se trata de una tonalidad más clara con respecto al plano completo. También es posible decir que la mayor parte del contorno conserva una temperatura homogénea. Nuevamente, el medio círculo en la parte superior se relaciona con el flux y la línea clara en el fondo del plano es la inyección de gas. Finalmente se puede concluir que existe una excelente correlación entre modelo físico y matemático.

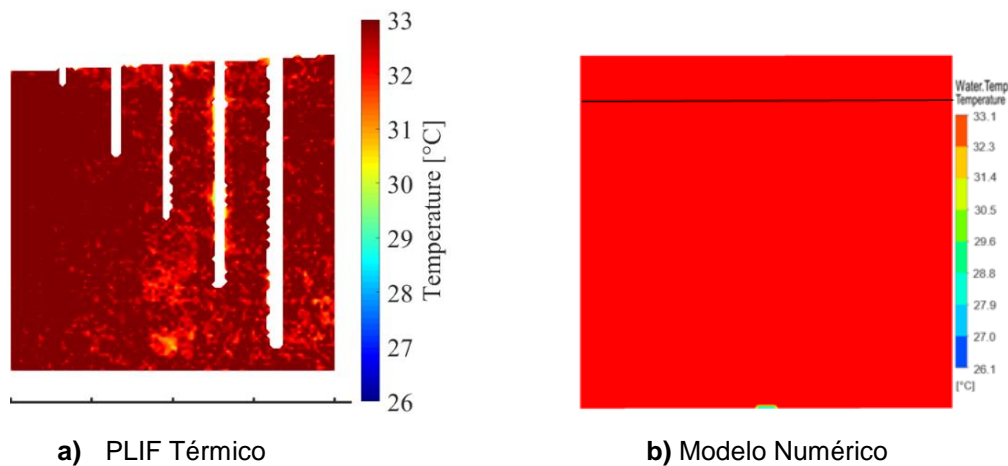


Figura 3.28 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 500 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

La Figura 3.28 muestra los contornos de temperatura obtenidos a un tiempo de 500 segundos mediante la aplicación de la técnica PLIF Térmico (3.28a) y modelado numérico (3.28b) para una inyección de gas céntrica. Con respecto al contorno experimental obtenido, es posible observar una predominancia de tonalidad rojo oscuro relacionado directamente con una temperatura de 33°C, mientras que en la parte inferior y superior central y a la derecha se puede apreciar la presencia de ruido con coloración naranja y algunos clusters amarillos correspondientes a una temperatura de 30.5 °C. Por su parte, los resultados obtenidos mediante el modelo numérico evidencian un plano de temperatura completamente homogéneo con coloración naranja. Al comparar ambos resultados en cuanto a tonalidad existe cierta variación en la intensidad de rojos pues el modelo experimental presenta una mayor cantidad de rojo oscuro mientras que el modelo matemático cuenta con un rojo natural.

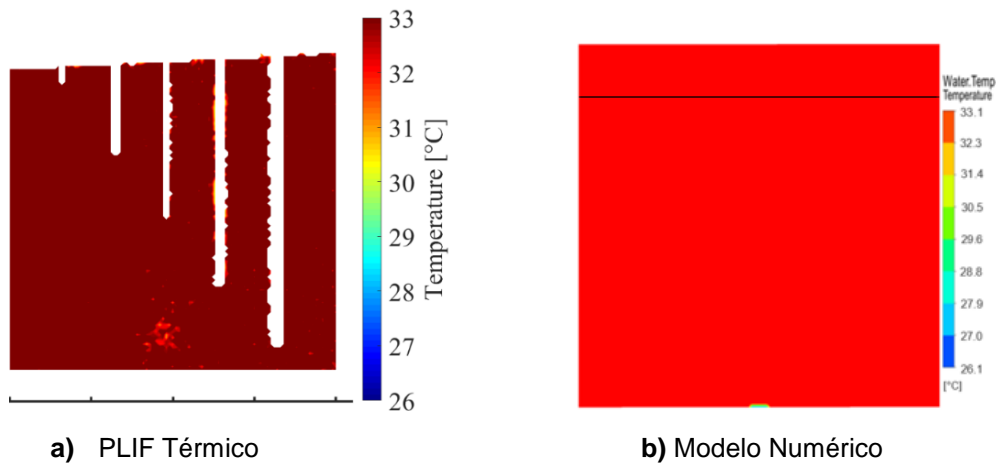


Figura 3.29 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 600 segundos con una inyección de gas céntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.29 se observan los resultados arrojados de los contornos de temperatura en el plano 3 a un tiempo de 600 segundos por la implementación de la técnica PLIF Térmico (3.29a) y la simulación numérica (Figura 3.29b) con el software ANSYS FLUENT®. Como lo muestra la medición experimental, con un tiempo de 600 segundos la distribución de temperatura en el plano de medición fue casi por completo homogénea salvo una zona clara en la parte central inferior del contorno. Por tanto, se puede deducir que la temperatura final del baño fue de 33°C. Con respecto al resultado numérico, sí se pone especial atención al plano obtenido a un tiempo de 600 segundos con respecto al plano obtenido a 500 segundos se puede observar una coloración ligeramente más opaca de color rojo en el plano de la Figura 3.29b (a 600 segundos) comparado con el de la Figura 3.28b (a 500 segundos). Centrándose en la Figura 3.29b, se tiene un contorno de temperatura completamente homogéneo. Finalmente, en cuanto a homogeneidad en los contornos obtenidos se tiene buena concordancia entre el modelo físico y el numérico, sin embargo, con respecto a la tonalidad, el rojo del modelo matemático no alcanza en escala al rojo del modelo físico puesto que este último es más oscuro.



### 3.2.3.2. Inyección excéntrica

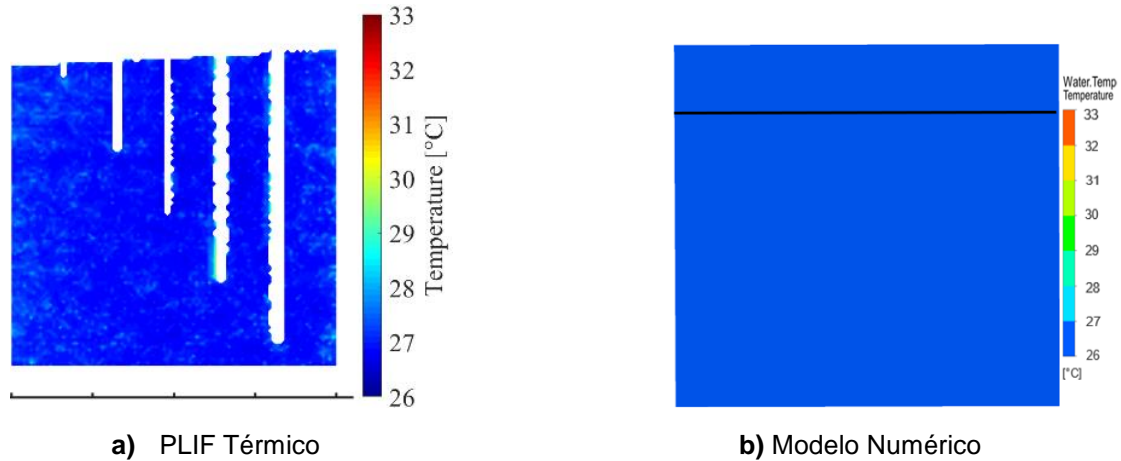


Figura 3.30 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 000 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.30 es posible apreciar los contornos de temperatura obtenidos a un tiempo inicial mediante la aplicación de la técnica PLIF térmico (3.30a), así como los arrojados por la simulación numérica (3.30b) para una inyección de gas excéntrica. En el resultado experimental se observa un color azul marino predominante en todo el plano de medición mientras que algunos pixeles son de tonalidad azul cielo; esto representa una temperatura inicial de 26°C. En cuanto al resultado de la simulación numérica se tiene un contorno completamente homogéneo. Comparando ambos planos de temperatura, se tiene la misma tonalidad en los dos casos, por tanto, la concordancia entre simulación y experimento se considera alta, aunque es la condición inicial de la simulación, es meritoria la medición.

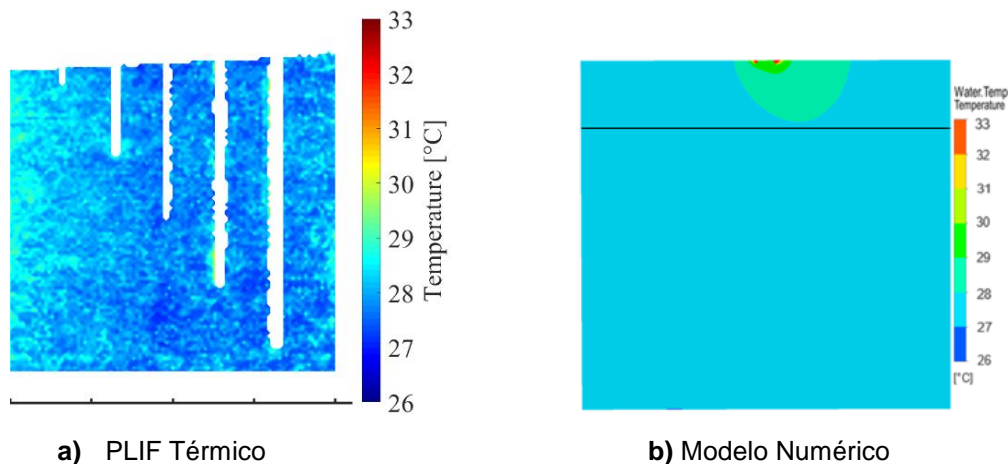


Figura 3.31 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 100 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

La Figura 3.31 muestra los mapas de temperatura a 100 segundos provenientes de la técnica PLIF térmico (3.31a) y modelado numérico (3.31b) para una inyección de gas excéntrica. En la medición se aprecia un contorno de temperatura heterogéneo con una

tonalidad predominantemente azul cielo hacia orilla izquierda del plano y con una menor presencia conforme se tiene un acercamiento con la parte central donde predomina la tonalidad azul marino y finalmente, a la derecha del contorno vuelven a aparecer clusters de tonalidad azul cielo. En cuanto al modelo matemático, se tiene una mancha de coloración verde en la parte superior a la línea negra correspondiente al flux, mientras que la zona de bajo de la línea negra (enmascaramiento) es homogénea con un rango de temperatura de entre 27 y 28°C. La concordancia entre el resultado proveniente del modelo físico y el matemático es buena puesto que las temperaturas son bastante similares.

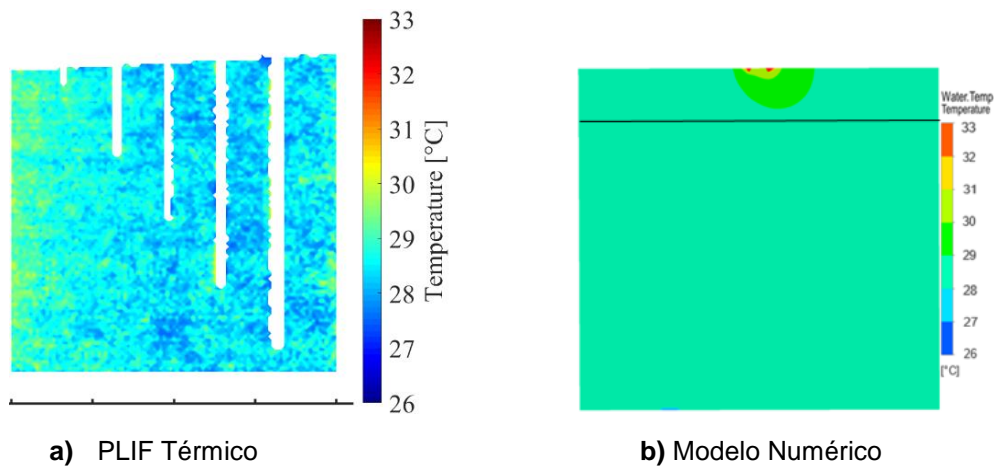


Figura 3.32 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 200 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

Con respecto a la Figura 3.32, se observan los contornos de temperatura obtenidos a un tiempo de 200 segundos obtenidos mediante la técnica PLIF térmico (3.32a) y simulación (3.32b) para una inyección de gas excéntrica. En el resultado experimental es posible apreciar una predominancia de color verde agua correspondiente a una temperatura de entre 28 y 29 °C. También se revela un fondo azul marino de menor temperatura en la zona derecha del plano, mientras que la orilla izquierda se carga de tonalidad verde agua, por tanto, el rango de temperaturas en el plano va de los 28 a los 30°C. Ahora bien, en cuanto al resultado numérico, se muestra un comportamiento completamente homogéneo en el contorno con un color verde agua bastante similar al presentado por el modelo físico, y el rango de temperatura en el modelo matemático va de 28 a 29°C, por lo que se tiene una buena concordancia entre modelo físico y numérico.

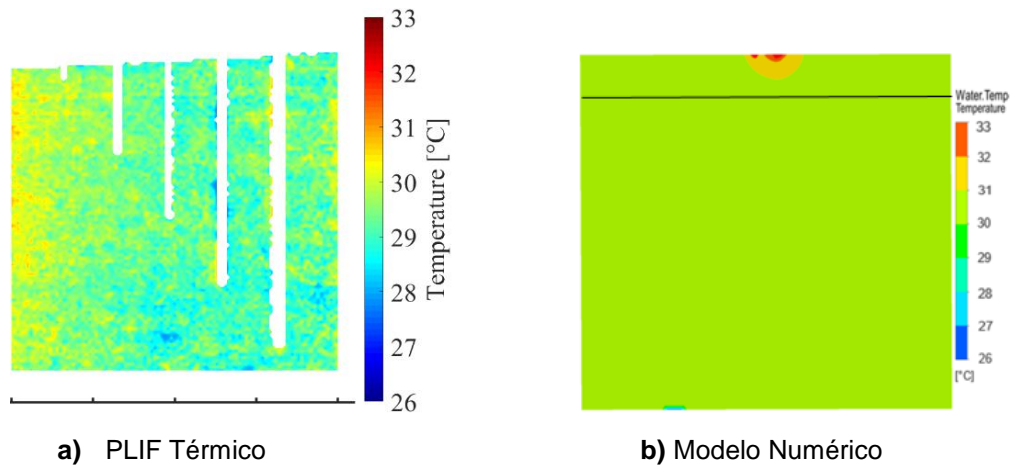


Figura 3.33 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 300 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.33 se muestran los resultados arrojados de los contornos de temperatura en el plano 3 por la técnica PLIF Térmico (3.33a) y modelado matemático (3.33b) a los 300 segundos para una inyección de gas excéntrica. La Figura 3.33a muestra un color predominantemente amarillo más cargado en la orilla izquierda con respecto a todo el plano de medición, correspondiente a una temperatura de entre 30 y 31°C. Además, se aprecia una gran zona con pixeles coloreados de tonalidad azul cielo y algunos clusters de color azul marino, por tanto, el rango de temperatura va de 27 a 31°C. Los colores mencionados anteriormente en conjunto alcanzan un color semejante a verde. Por otro lado, en la figura 5.33b, se observa un contorno de temperatura verde cartuja completamente homogéneo, ya que la línea inferior izquierda de color azul cielo corresponde a la inyección de aire excéntrica mientras que la zona roja superior central exhibe al flux. Al comparar ambos planos se puede decir que se tiene una ligera concordancia entre modelo físico y matemático.

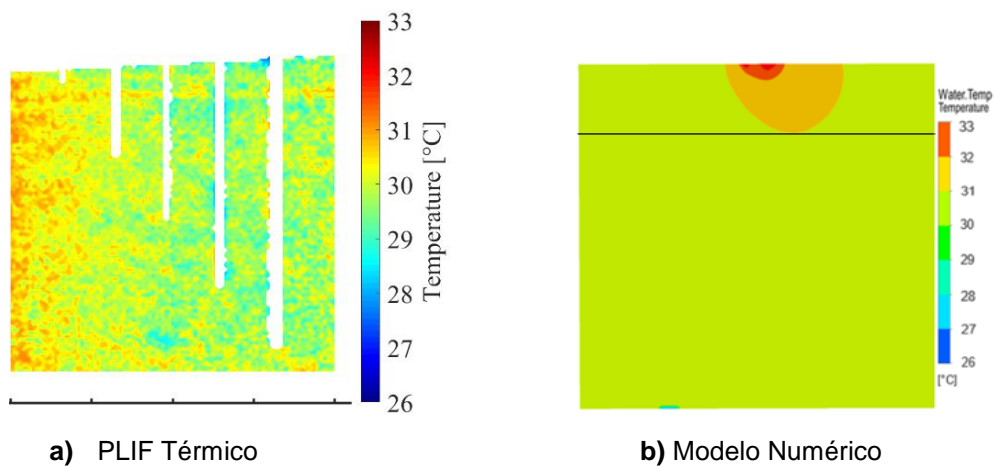


Figura 3.34 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 400 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

La Figura 3.34 muestra los contornos de temperatura obtenidos a 400 segundos mediante la implementación de la técnica PLIF Térmico (3.34a) y simulación (3.34b) con una inyección de gas excéntrica. Para el contorno experimental se observa una distribución heterogénea con una mayor coloración amarilla, una tonalidad naranja cargada en la orilla izquierda mientras que en la zona derecha y central se tienen pixeles con coloración azul cielo, dicho lo anterior, el rango de temperatura para el plano va de 29 a 31°C. Con respecto a la simulación, se tiene una distribución de temperatura homogénea con una tonalidad verde lima correspondiente a 31°C. Por tanto, al comparar los mapas de temperatura obtenidos de la simulación y de la experimentación se puede decir que se tiene una buena concordancia.

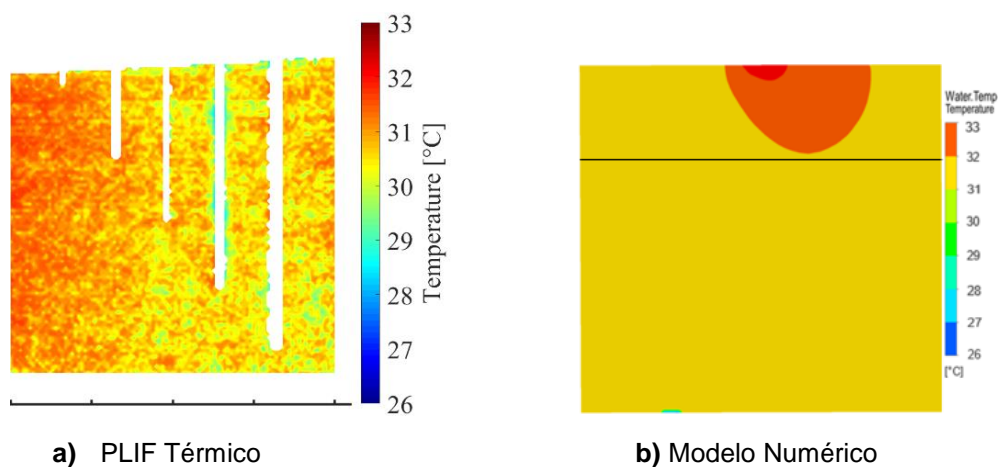


Figura 3.35 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 500 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

En la Figura 3.35 se aprecian los resultados obtenidos de los contornos de temperatura en el plano 3 a un tiempo de 500 segundos mediante la aplicación de la técnica PLIF Térmico (3.35a) y modelado matemático (3.35b) con una inyección de aire excéntrica. El mapa de temperatura experimental muestra dos tonalidades principales; naranja y amarillo con pequeños clusters de color verde; la coloración naranja se carga hacia la orilla izquierda del plano mientras que la amarilla se inclina hacia la derecha. Por tanto, se tiene un rango de temperaturas de entre 30 y 32°C. Ahora bien, el contorno resultante de la simulación numérica presenta una distribución de temperatura homogénea con tonalidad amarillo pálido, lo que corresponde a una temperatura de 32°C. La línea verde que se aprecia en la parte inferior izquierda corresponde a la inyección de gas, mientras que la mancha naranja superior tiene su origen en el flux de calor suministrado al sistema. De lo anterior, se puede decir que existe una correcta concordancia entre el modelo físico y el modelo numérico.

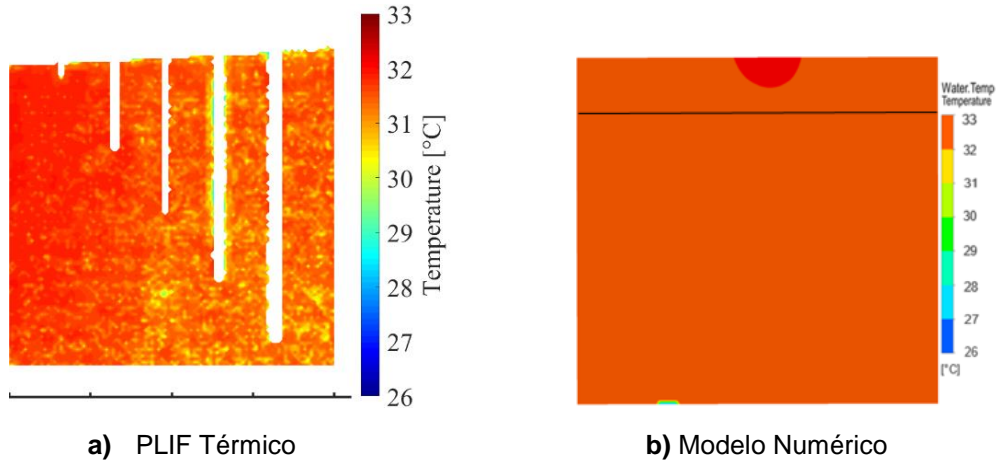


Figura 3.36 Contornos de temperatura obtenidos para un tiempo de 600 segundos con una inyección de gas excéntrica. a) Medidos con PLIF, b) calculados con el modelo matemático.

Con respecto a la Figura 3.36, se observan los mapas de temperatura a 600 segundos arrojados por la técnica PLIF Térmico (3.36a) y la simulación (3.36b) con una inyección de aire excéntrica. En cuanto a la Figura 3.36a, se muestra un color naranja intenso hacia la orilla izquierda del plano mientras que conforme se avanza hacia la derecha la tonalidad pasa a ser amarilla con algunas líneas verticales de color verde. Esto se interpreta con un rango de temperatura de entre 30.5 a 32.5°C. Por su parte, en la Figura 3.36b se muestra un plano de temperatura sin gradientes de color y con una tonalidad homogénea naranja, lo que se interpreta en una temperatura de 32 a 33°C sin llegar a los 33°C (color rojo). Comparando ambos incisos se puede decir que se tiene una buena concordancia entre el resultado obtenido de la simulación y el obtenido por la técnica de PLIF Térmico.

### 3.1.4 Resultados de la validación del modelo matemático con termopares

#### 3.1.4.1 Inyección céntrica

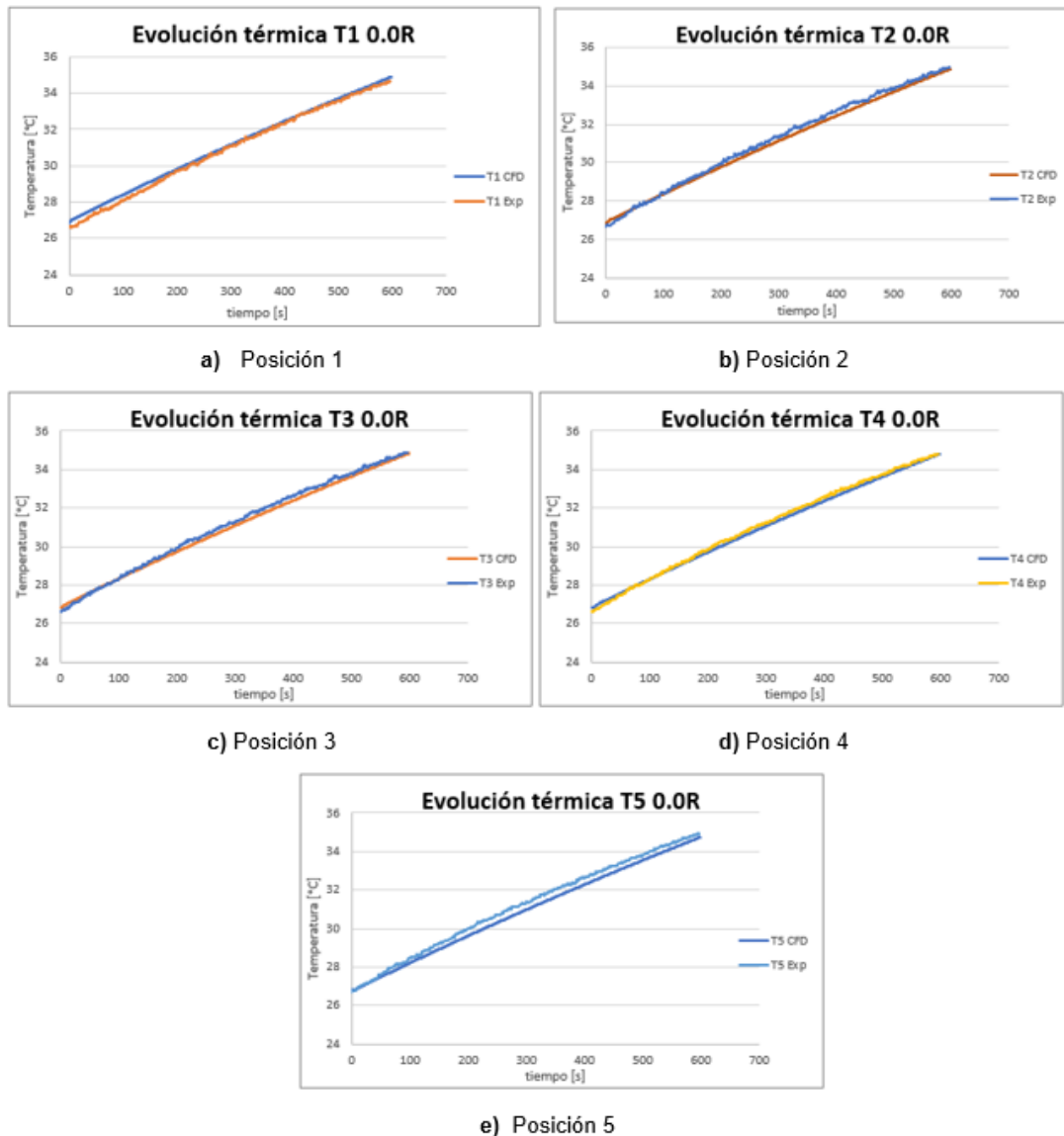


Figura 3.37 Comparación de la evolución térmica obtenida por CFD y experimental para los termopares colocados en las posiciones 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) y 5 (e) para inyección de gas céntrica.

En la Figura 3.37 se muestra la validación de la evolución térmica en distintas posiciones del modelo físico para la inyección de gas céntrica, que básicamente compara la temperatura medida por cada termopar usado en el modelo físico, contra la historia térmica simulada en ANSYS FLUENT® en ese mismo punto. Se aprecia una excelente concordancia entre las curvas obtenidas mediante el modelo físico con las resultantes del modelo matemático. Dicho lo anterior se concluye que el modelo matemático propuesto cumple con lo requerido y que se trata de una buena aproximación para simular el mezclado

térmico del Horno Olla. Se debe mencionar que las curvas con mayor discrepancia se encuentran en la Figura 3.37e, esto debido a que la posición 5 se encuentra en una zona de baja velocidad disminuyendo el mezclado térmico.

### 3.2.4.2 Inyección excéntrica

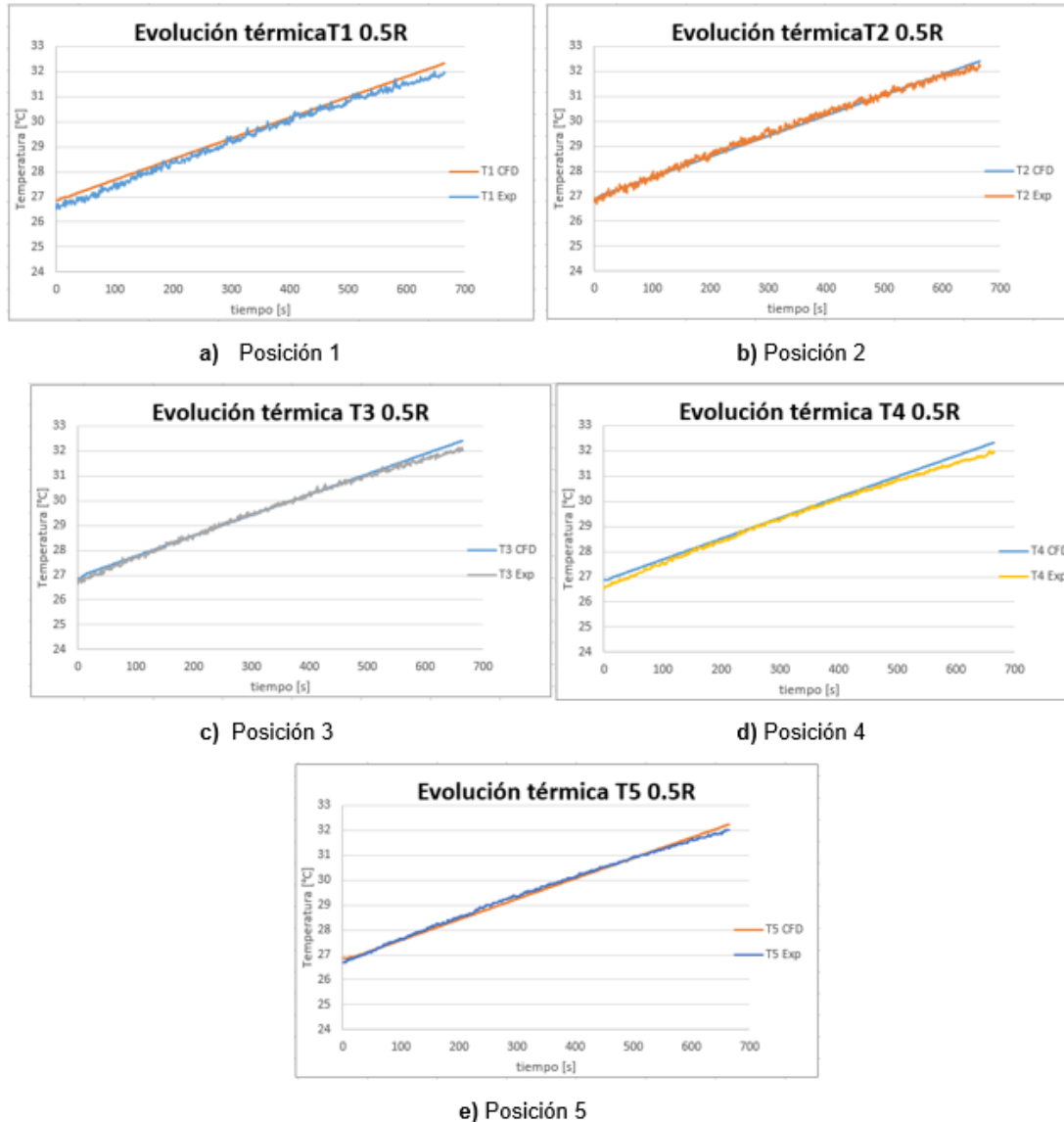


Figura 3.38 Comparación de la evolución térmica obtenida por CFD y experimental para los termopares colocados en las posiciones 1(a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) y 5 (e) para inyección de gas excéntrica.

La Figura 3.38 muestra la validación de la evolución térmica en distintas posiciones del modelo físico para la inyección de gas excéntrica, que básicamente compara la temperatura medida por cada termopar usado en el modelo físico, contra la historia térmica simulada en ANSYS FLUENT® en ese mismo punto. A pesar de existir cierta separación entre las zonas iniciales y finales de las curvas experimentales y simuladas de las Figuras 3.38a y 3.38e,

esta diferencia no es muy grande. La Figura 3.38b es la que muestra la mayor concordancia entre el caso experimental y el simulado. Una consideración importante es que para la curva de la posición 5 (ver Figura 3.38e) se tiene un mejor ajuste entre resultados comparado con la misma posición del experimento céntrico, lo que corrobora una mejor zona de mezclado térmico sin la presencia de zonas muertas. Finalmente, se puede concluir que el modelo matemático propuesto para la inyección excéntrica cumple con la aproximación al modelo físico por lo que puede ser empleado para simular distintas condiciones de mezclado térmico.

Tabla 12. Temperaturas iniciales y finales de los experimentos de mezclado térmico para 10 minutos de experimento.

Inyección	Temperatura inicial promedio [°C]	Temperatura final promedio [°C]	$\Delta T$
<b>Céntrica</b>	26.7	34.8	8.1
<b>Excéntrica</b>	26.6	32	5.4

En la Tabla 12 se muestra el promedio de las temperaturas inicial y final en ambos experimentos, se aprecia que las temperaturas iniciales fueron prácticamente las mismas pero las finales difirieron, ya que el modelo con inyección céntrica muestra una temperatura final mayor comparada con la temperatura final del modelo con inyección excéntrica, los valores de  $\Delta T$  fueron de 8.1 y 5.4 °C, respectivamente.



### 3.1.5 Pérdidas de energía

#### a) Inyección axisimétrica

La energía transferida al agua se puede estimar calculando el calor sensible medido a través del cambio de temperatura promedio del agua desde el inicio hasta el final del calentamiento como:

$$Q = mC_p\Delta T = Vol * \rho * C_p * \Delta T = (0.00477m^3) * \left(\frac{4179J}{KgK}\right) * \left(\frac{1000Kg}{m^3}\right) (308 - 300K)$$
$$= \mathbf{159471J}$$

Estos 159,471 J los ha ganado el agua al subir de 300 K (27 °C) a 308 K (35 °C). Además, se puede calcular la eficiencia del calentamiento, la cual fue de 40% para la inyección céntrica, y que se puede determinar al medir la cantidad de gas empleado durante los diez minutos de calentamiento y calcular el poder calórico de esa masa de gas quemada (ver Apéndice A).

$$Eficiencia: \frac{159471J}{400423J} * 100 = \mathbf{40\%}$$

El 60% del resto de la energía que se quemó en la flama, se puede suponer como una pérdida principalmente por el mecanismo de convección.

#### b) Inyección excéntrica

Como se hizo con la inyección axisimétrica, el cálculo de la energía transferida al agua se obtiene mediante el cálculo del calor sensible a través del cambio de temperatura promedio del agua desde la temperatura inicial hasta la temperatura final del calentamiento, expresado en la siguiente ecuación:

$$Q = mC_p\Delta T = Vol * \rho * C_p * \Delta T = (0.00477m^3) * \left(\frac{4179J}{KgK}\right) * \left(\frac{1000Kg}{m^3}\right) (305 - 300K)$$
$$= \mathbf{99669J}$$

Así, la energía ganada por el agua fue de 99669 J al aumentar de 27°C (300 K) a 32°C (305 K). Finalmente, en el caso de la inyección excéntrica la eficiencia fue del 25%. Por tanto, se puede decir que el modelo con inyección céntrica fue el más eficiente.

$$Eficiencia: \frac{99669J}{400423J} * 100 = \mathbf{25\%}$$

## **3.2 *Discusión de Resultados***

### *3.4.1 Dinámica de fluidos*

Con respecto a la validación del modelo matemático con los resultados obtenidos mediante PIV en la parte de dinámica de fluidos, si bien las Figuras 3.1 a, b y c muestran el mismo orden de magnitud y por tanto, velocidades de agua similares, se aprecia que el modelo matemático presenta las mayores velocidades máximas independientemente de la altura de la medición, esto se debe a que falta un parámetro de interacción en la simulación denominado “dispersión turbulenta” este puede ser modelado mediante el coeficiente de López de Bertodano, activando esta interacción en ANSYS FLUENT® muy probablemente las zonas en punta de los resultados de la simulación se achatarían pues se presentaría un modelado más cercano a la realidad ya que la pluma tendría cierta abertura conforme se asciende en el plano. Otra mejora que se ha notado necesaria en el modelo es la activación de un balance poblacional de burbujas y de un mejor tratamiento de la deformación de la superficie libre que describa de mejor manera el flujo de fluidos en esa zona, que es la que presenta predicciones más alejadas de las mediciones experimentales.

Al comparar las figuras 3.1 a, b y c se observa que para la posición de inyección de gas excéntrica se tiene una mayor velocidad de agua, a pesar de que en ambos casos se inyectó el mismo flujo (1.54 lpm): esto se debe a que al estar la pluma en mayor contacto con la orilla derecha del modelo se tiene una zona de mayor turbulencia debido al choque del fluido con la pared, por lo que la velocidad aumenta.

En el caso de la comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante CFD para el experimento céntrico en los planos 2 y 3 se debe poner atención primeramente en que las recirculaciones formadas en el plano simulado siempre tienen una posición distinta a las experimentales esto se debe a que en el modelado físico se tienen factores externos que modifican estos patrones de flujo, como por ejemplo la variación en la inyección de gas por parte de la compresora lo cual se traduce en una variación de los diámetros de burbuja de la pluma, mientras que en el caso de la simulación no se tiene esta variación además de que el flujo suministrado es completamente constante. Ahora bien, la formación de la pluma se da debido a que el gas inyectado arrastra (mediante la interacción de fuerza de arrastre) parte del líquido en su ascenso y al momento en que este sale del sistema el agua debe cambiar de un movimiento axial a una radial por lo que, al llegar a la pared del sistema esta cuenta con condición de no deslizamiento lo que provoca una turbulencia (pequeñas zonas en las orillas) con lo que aumenta ligeramente la velocidad.

Esta interacción no es lo suficientemente fuerte para llegar hasta el fondo del sistema con lo que se crean las denominadas zonas muertas. En cuanto a la diferencia entre tonalidades oscuras entre los resultados experimental y simulado presentados en las Figuras 3.5 y 3.9 para el caso de la energía cinética turbulenta ésta se da debido a la falta de la interacción de fuerza de dispersión turbulenta entre la fase líquida (agua) y la fase gaseosa dispersa (aire) en el modelo matemático. A favor de este trabajo, se puede argumentar que no existe hasta este momento en la literatura una comparación, tanto en inyecciones céntricas como excéntricas, de la energía cinética turbulenta medida y predicha y que lo que se ha reportado es una sobrepredicción de un orden o varios órdenes de magnitud, por lo que nuestro modelo es sin duda superior a los publicados hasta el momento, pero se necesita aún más esfuerzo para lograr una concordancia que garantice una representación fiel de la turbulencia en la olla por parte del modelo matemático. Lo mismo sucede con la Figura 3.6 y 3.10 con las líneas de flujo pues el modelo matemático, al no tener un ajuste en el modelo de turbulencia completo difiere de los resultados obtenidos experimentalmente. Como ya se ha mencionado, la implementación de balances poblacionales y el tratamiento de la superficie libre más realista también son mejoras a futuro en nuestro modelo que ayude a representar de mejor manera la fluido dinámica en la olla.

Cuando la inyección de gas es excéntrica y medida en los planos 1 y 2 se presentan las mismas complicaciones que en el experimento céntrico las cuales son: diferencia entre los valores experimentales y los obtenidos por simulación para la energía cinética turbulenta, formación de las recirculaciones en distintas posiciones del plano de medición, estas dos han sido explicadas con anterioridad. Por ejemplo, la Figura 3.18 muestra una diferencia significativa en las líneas de corriente obtenidas mediante modelado físico y matemático. Esto se debe primeramente a que el plano de medición se encuentra alejado de la inyección de gas con lo que es más complicado obtener un contorno con un comportamiento constante pues este plano es un plano secundario de flujo el cual solo depende de la turbulencia, por ende, es difícil con los modelos de turbulencia disponibles representar la turbulencia del flujo primario y es aún más difícil la presencia de los flujos secundarios. La segunda causa de esta discrepancia, puede ser por la falta de implementación de la interacción turbulenta mencionada anteriormente lo cual quita realidad al modelo matemático. Se debe recordar que se utilizó un modelo Euler-Euler por lo que es importante mejorar la predicción de la distribución real de las burbujas como de sus tamaños.

Ahora bien, comparando las inyecciones de gas céntrica y excéntrica se observa que para la inyección céntrica se crean zonas de baja velocidad en las esquinas inferiores del plano mientras que para la inyección excéntrica estas zonas no se forman. Esto se debe a que en la inyección excéntrica el líquido después de ser arrastrado hasta la interfase aire-agua es expulsado hacia la izquierda con lo que adquiere una mayor velocidad (pues está principalmente en una dirección) con esta velocidad tienen una mayor capacidad de bajar a través de la pared izquierda y al momento de llegar a la esquina inferior izquierda es nuevamente arrastrado por el momentum de la inyección de gas evitando así la formación de las zonas muertas. Además, la circulación en toda la olla que se presenta en la inyección excéntrica fomenta el arrastre de líquido hacia la pluma y la circulación abarca mayor volumen de la olla que la circulación con inyección céntrica. Se nota un doblez en la pluma hacia la pared, provocada por la inercia de fluido circulante que choca con la pluma y la dobla (Efecto Noanda), esto puede causar un desgaste excesivo del refractario de la olla que en la práctica habría que cuidar al no poner tan cerca el tapón excéntrico de la orilla de la olla. Por tanto, se tiene un mejor mezclado químico con inyección excéntrica que con inyección céntrica.

### 3.2.2 *Conservación de energía*

En cuanto a los contornos de PLIF Térmico, la Figura 3.19 muestra que se mantiene la temperatura sin mucha variación durante los primeros 200 segundos del experimento, posteriormente sube después de este tiempo con mayor velocidad. Esto se atribuye a que en un inicio el volumen de agua se calienta por la parte superior afectando solo el área superficial a través del quemador por conducción, pero conforme la zona caliente circula en todo el volumen de agua fría en la olla, existe una transferencia de calor más eficiente por convección entre fluido caliente y frío. De manera general, la heterogeneidad presente en los contornos de temperatura medidos se debe a que se trata de una imagen tomada a un cierto paso de tiempo en el cual, al tomar una imagen de ese instante no es posible tener la misma luminosidad en todas las zonas, lo que da lugar a la variación en las tonalidades presentes en los planos de medición. Además, las burbujas, a pesar de estar alejadas del plano de medición afectan la medición en algunas imágenes (Figs. 3.19c, 3.19d, 3.19e y 3.19f) se aprecian decoloraciones asociadas a las burbujas. Otros brillos o reflejos de luz provenientes por ejemplo de los termopares también pueden causar estas heterogeneidades en los contornos de temperatura medidos.

Con respecto a la Figura 3.20 se tiene una mayor polarización en las mediciones de los contornos obtenidos comparados con los resultados obtenidos de la inyección céntrica, esto se debe a una variación en la concentración de Rodamina B con respecto a la calibración. Pues, como se comprobará más adelante, se tiene un mezclado térmico homogéneo en ambos experimentos. Además, la coloración final obtenida es naranja, esto quiere decir que se alcanzó una temperatura final menor que la obtenida con inyección céntrica. Este resultado se debe a que durante el experimento, el quemador se mantuvo en la parte central del modelo físico por lo que, en el caso de la inyección céntrica el flux inducido al fluido está en contacto directo con la pluma del aire mientras que para el modelo excéntrico, el quemador se encuentra alejado de la fuente de turbulencia y mezclado, dando como resultado un menor mezclado térmico lo que se traduce en una menor capacidad y eficiencia en el calentamiento, y por tanto, se alcanza una temperatura final menor.

En la Figura 3.21 incisos c) y e) se aprecia en las esquinas inferiores un color distinto al del plano completo, lo que refleja que se tiene una menor temperatura en esa zona, estas zonas se forman debido a que durante la fluido dinámica de la inyección céntrica el fluido genera zonas de recirculación que no tienen la capacidad de arrastrar al líquido hasta las esquinas inferiores dando lugar a las denominadas “zonas muertas” descritas anteriormente. Estas zonas muertas retrasan el mezclado tanto químico como térmico del modelo por lo que, para esa captura de tiempo tomada, no se había completado el calentamiento del fluido en esas zonas. Lo anterior se comprueba al observar la Figura 3.22 incisos c) y e) en donde no se tiene presencia de estas zonas pues se tiene una mejor dinámica de fluidos. De manera general, para ambas Figuras 3.21 y 3.22 los contornos de temperatura son completamente homogéneos comparados a los obtenidos en las Figuras 3.19 y 3.20. Se puede concluir que el fenómeno del mezclado térmico con una fuente de calor en la parte superior, provoca básicamente un baño isotérmico y que el aumento de la temperatura en el mismo únicamente depende del tiempo, con rampas de calentamiento casi lineales con el tiempo.

Con respecto a la Figura 3.23a, es posible apreciar un destello de tonalidad azul claro en la esquina superior derecha, este destello corresponde a un reflejo que no pudo detenerse mediante el enmascaramiento del modelo físico y, por tanto, el código generado lo procesa como una mayor temperatura. La Figura 3.24a muestra la aparición de clusters de tonalidad amarillo en la orilla derecha del plano de medición, esto se debe a que, para ese tiempo, en ese instante se tiene una turbulencia en el fluido, lo que dificulta el procesamiento de

datos. En las Figuras 3.25 y 3.26 los colores obtenidos en los contornos experimental y numérico tienen una buena concordancia, sin embargo, la heterogeneidad que los contornos experimentales muestran con respecto a los numéricos se debe a las condiciones de operación experimental, como ya se describió anteriormente. Es decir, tiene mucho que ver la calibración realizada, los reflejos indeseados por burbujas, u otros elementos, el mantener el enmascaramiento en el modelo físico y la fluido dinámica que presenta el líquido. La Figura 3.27 muestra zonas de baja temperatura en el área inferior debido a las zonas muertas provocadas por la inyección de gas céntrica. Finalmente, las Figuras 3.28 y 3.29 muestran que en el caso del modelo numérico el contorno de temperatura se mantuvo casi constante mientras que en el experimento la variación fue superior para cada tiempo. Las mismas explicaciones hechas anteriormente aplican a estas discrepancias, aunque a favor del trabajo, se puede decir que la medición es muy novedosa y que ha sido exitosa.

Para el caso de las Figuras 3.30 y 3.31 se aprecia que, entre modelo numérico y físico, los resultados en cuanto a homogeneidad del plano de medición son muy parecidos mientras que a partir de la Figura 3.32, la polarización en el contorno comienza a ser evidente. Esto se debe a que, durante el fenómeno de mezclado térmico, al inicio las corrientes convectivas actúan con menor rapidez mientras que conforme el tiempo pasa se llega a un punto en el que esta velocidad de calentamiento aumenta por lo que al momento de obtener la imagen a un determinado tiempo se tiene una mayor heterogeneidad en los resultados experimentales. Esto no sucede en el resultado numérico debido a que éste no contempla el uso de la Rodamina ni con los ruidos ópticos ya explicados. Lo anterior se puede apreciar a partir de la Figura 3.33 y hasta la Figura 3.35 pues en la Figura 3.36 la polarización comienza a disminuir, esto debido a que los gradientes de temperatura se hacen más pequeños por lo que la fuerza de mezclado térmico en el sistema se ve disminuida. Se tiene una pérdida de las zonas muertas en la parte inferior de los contornos. Además, el hecho de que la polarización en los planos de temperatura para la inyección excéntrica sea mayor que la que presentan los obtenidos mediante inyección céntrica se debe a que éstos, al tener una mejor dinámica de fluidos presentan una mayor turbulencia por lo que al momento de procesar los datos existe una mayor complejidad para el código. Finalmente, la inyección excéntrica brinda un mejor mezclado tanto químico como térmico.

En el caso de la figura 3.37e y 3.38e como se mencionó anteriormente, la curva de evolución térmica en la posición 5 es la que presenta la mayor variación entre la simulación

y los resultados obtenidos mediante los termopares tipo K para el caso de la inyección céntrica y excéntrica. Esto se debe a las zonas muertas que se crean debido a la menor calidad de mezclado químico que la inyección céntrica ofrece comparado con la inyección excéntrica. El buen ajuste de las curvas se debe a que el flux calculado de entrada al volumen de agua si cumplió con los requerimientos. Finalmente, la Tabla 12 muestra un  $\Delta T$  mayor en el caso de la inyección céntrica con respecto a la excéntrica, esto se debe a que, si bien la inyección excéntrica proporciona un mejor mezclado químico (una mejor dinámica de fluidos) debido a la posición en la que el quemador estaba colocado (exactamente en el centro geométrico del modelo físico) éste incidía directamente sobre la pluma de fluido-gas formada. Por lo que al ser esta una zona de alta turbulencia permitía una mejor distribución del fluido calentado hacia todo el volumen de agua. En cambio, para el caso de la inyección excéntrica al no estar en contacto directo el quemador con la zona de mayor turbulencia, resulta ser más difícil obtener un buen mezclado térmico en el mismo tiempo de experimentación. El hecho de que se tenga un mejor mezclado térmico cuando se inyecta el gas en una posición céntrica que cuando se inyecta en una posición excéntrica, esto cuando la posición del quemador está en el centro geométrico del modelo, indica que los mecanismos de transporte convectivos y de dispersión turbulenta actúan mejor con la inyección céntrica que con la excéntrica, caso contrario a lo que ocurre con el mezclado químico reportado en otros trabajos.

### 3.2.3 Pérdidas de energía

Después de observar las pérdidas de energía obtenidas tanto para la inyección axisimétrica como para la excéntrica, la mayor eficiencia que se presenta en la inyección céntrica se debe a la posición del quemador sobre la inyección de aire. De esta manera, el hecho de que el calor incida de manera directa sobre el área de la pluma propicia un mejor mezclado térmico del fluido mientras que en la inyección excéntrica, debido a que esta incidencia no es directa se ralentiza el mezclado térmico a pesar de existir una mejor dinámica de fluidos. Con respecto a las pérdidas por radiación y convección, la radiación que la flama emite es despreciable con respecto al fenómeno de convección que se presenta entre la flama y el agua debido al alto valor del coeficiente de transferencia de calor presente en la interfase. También se descarta la posibilidad de pérdida de calor por cambio de fase, dado que la pérdida de fluido debida a evaporación es despreciable ya que el nivel de agua después de cada experimento no disminuía en sobremanera.

#### 4 Conclusiones

- ✓ Se implementó de manera exitosa la técnica PLIF térmico en un modelo físico de una olla agitada con gas tanto para la inyección axisimétrica como para la excéntrica pudiendo reproducir con termopares las temperaturas medidas con la técnica PLIF Térmico.
- ✓ Se desarrolló y validó un modelo numérico de un modelo físico que capturó tanto la dinámica de fluidos como el mezclado térmico medidos experimentalmente, tanto para inyección de gas axisimétrica como para la inyección de gas excéntrica, pudiendo obtener también similitud entre velocidades, energía cinética turbulenta patrones de flujo y temperaturas predichas con las medidas por PIV y en el caso de temperaturas, con termopares tipo K.
- ✓ Se midió el mezclado térmico en un modelo físico de una olla agitada con gas de manera axisimétrica y excéntrica en presencia de una fuente de calor simulando el calentamiento de acero con arcos eléctricos, a través de mapas de evolución de los contornos de temperatura medidos en un plano con la técnica PLIF Térmico y se encontró que el baño es casi isotérmico y solo se va calentando con el tiempo con una rampa de calentamiento casi lineal con el tiempo.
- ✓ Se tiene un mejor mezclado térmico cuando se inyecta el gas en una posición céntrica que cuando se inyecta en una posición excéntrica, esto cuando la posición del quemador está en el centro geométrico del modelo, lo cual indica que los mecanismos de transporte convectivos y de dispersión turbulenta actúan mejor con la inyección céntrica que con la excéntrica, caso contrario a lo que ocurre con el mezclado químico reportado en otros trabajos.
- ✓ Si bien el modelo numérico desarrollado se acerca bastante a la realidad, se requieren implementar varias mejoras al modelo para mejorar su realismo, sobre todo en planos alejados al flujo principal de la pluma, es decir, flujos secundarios. Entre las posibles mejoras se propone incluir la interacción turbulenta en ANSYS FLUENT® y representar la pluma de gas como una distribución de tamaños de burbuja en vez de una burbuja de tamaño constante, entre otras mejoras que se pueden implementar para afinar las predicciones con el modelo.



## 5 Bibliografía

- [1] [https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/infografia\\_canacero\\_2019.pdf](https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/infografia_canacero_2019.pdf)  
Consultada: 26 Noviembre 2019.
- [2] **Vehec, J. R.** (2010). *Technology Roadmap Research Program for the Steel Industry*. American Iron and Steel Institute.34. A. Ghosh, Secondary Steelmaking, CRC Press, 2001. pp 250-275.
- [3] **González Morales Daniel Ricardo**, Evaluación del efecto del espesor de escoria y de flujos asimétricos sobre el mezclado en una olla con dos tapones mediante modelado físico y matemático, Tesis de Licenciatura IQM, Facultad de Química, UNAM, 2018.
- [4] **Amaro-Villeda, A. M., Ramirez-Argaez, M. A., & AN, C.** (2014). Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling. *ISIJ international*, 54(1), 1-8.
- [5] **Mazumdar, D., & Evans, J. W.** (2009). *Modeling of steelmaking processes*. CRC Press. Pp 99-110.
- [6] **Putan, V., Vilceanu, L., Socalici, A., & Putan, A.** (2018, January). Mathematical and physical modeling of thermal stratification phenomena in steel ladles. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 294, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [7] **Jardón Pérez, L. E., Amaro-Villeda, A., Conejo, A. N., González-Rivera, C., & Ramírez-Argáez, M. A.** (2018). Optimizing gas stirred ladles by physical modeling and PIV measurements. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(8), 882-890.
- [8] **Nunes, R. P., Pereira, J. A. M., Vilela, A. C. F., & van der Laan, F. T.** (2007). Visualization and analysis of the fluid flow structure inside an elliptical steelmaking ladle through image processing techniques. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2(2), 139-150.
- [9] **Mazumdar, D., & Guthrie, R. I.** (1995). The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems. *ISIJ international*, 35(1), 1-20.
- [10] **Ghosh, A.** (2000). *Secondary steelmaking: principles and applications*. CRC Press. Pp 120-130.
- [11] **Mietz, J., & Oeters, F.** (1989). Flow field and mixing with eccentric gas stirring. *Steel Research*, 60(9), 387-394.
- [12] **He, F., He, D. F., Xu, A. J., Wang, H. B., & Tian, N. Y.** (2014). Hybrid model of molten steel temperature prediction based on ladle heat status and artificial neural network. *Journal of Iron and Steel Research International*, 21(2), 181-190.

- [13] Lv, W., Mao, Z., Yuan, P., & Jia, M. (2014). Pruned bagging aggregated hybrid prediction models for forecasting the steel temperature in ladle furnace. *steel research international*, 85(3), 405-414.
- [14] Safonov, V. M., Smirnov, A. N., Tsuprun, A. Y., & Oshovskaya, E. V. (2010). Effect of some technical and technological parameters on the efficiency of ladle treatment of steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010(6), 475-478.
- [15] Grip, C. E., Jonsson, K. O., Eriksson, S., Jonsson, L., Jönsson, P., & Pan, Y. (2000). Theoretical and practical study of thermal stratification and drainage in ladles of different geometry. *Scandinavian journal of metallurgy*, 29(1), 30-38.
- [16] Farrera-Buenrostro, J. E., Hernández-Bocanegra, C. A., Ramos-Banderas, J. A., Torres-Alonso, E., López-Granados, N. M., & Ramírez-Argáez, M. A. (2019). Analysis of Temperature Losses of the Liquid Steel in a Ladle Furnace During Desulfurization Stage. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72(4), 899-909.
- [17] Turkoglu, H., & Farouk, B. (1992). Effect of gas injection velocity on mixing and heat transfer in molten steel baths. *Numerical Heat Transfer*, 21(4), 377-399.
- [18] Liu, Y., Ersson, M., Liu, H., Jönsson, P. G., & Gan, Y. (2019). A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(1), 555-577.
- [19] Lou, W., & Zhu, M. (2013). Numerical simulation of gas and liquid two-phase flow in gas-stirred systems based on Euler–Euler approach. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(5), 1251-1263.
- [20] Méndez, C. G., Nigro, N., & Cardona, A. (2005). Drag and non-drag force influences in numerical simulations of metallurgical ladles. *Journal of materials processing technology*, 160(3), 296-305.
- [21] Woo, J. S., Szekely, J., Castillejos, A. H., & Brimacombe, J. K. (1990). A study on the mathematical modeling of turbulent recirculating flows in gas-stirred ladles. *Metallurgical Transactions B*, 21(2), 269-277.
- [22] Ganguly, S., Kumar, A., & Chakraborty, S. (2004). Numerical investigation of chaotic mixing in gas stirred steel ladles. *ISIJ international*, 44(11), 1960-1962.
- [23] Szekely, J., Iguchi, M., Takeuchi, H., & Morita, Z. I. (1993). A comparison of experimentally measured and theoretically calculated velocity fields in a water model of an argon stirred ladle. *ISIJ international*, 33(4), 474-478.

- [24] **Joo, S., & Guthrie, R. I. L.** (1992). Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single-and dual-plug bubbling operations. *Metallurgical Transactions B*, 23(6), 765-778.
- [25] **Szekely, J., Wang, H. J., & Kiser, K. M.** (1976). Flow pattern velocity and turbulence energy measurements and predictions in a water model of an argon-stirred ladle. *Metallurgical Transactions B*, 7(2), 287-295.
- [26] **Maldonado-Parra, F. D., Ramírez-Argáez, M. A., Conejo, A. N., & González, C.** (2011). Effect of both radial position and number of porous plugs on chemical and thermal mixing in an industrial ladle involving two phase flow. *ISIJ international*, 51(7), 1110-1118.
- [27] **Ghosh, A.** (2017). Review of Our Investigations on Ladle Furnace. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(2), 443-452.
- [28] **Xia, J. L., & Ahokainen, T.** (2003). Homogenization of temperature field in a steelmaking ladle with gas injection. *Scandinavian journal of metallurgy*, 32(4), 211-217.
- [29] **Mazumdar, D., & JW, E.** (2004). Macroscopic models for gas stirred ladles. *ISIJ international*, 44(3), 447-461.
- [30] **Pan, Y., & Björkman, B.** (2002). Numerical analysis on the similarity between steel ladles and hot-water models regarding natural convection phenomena. *ISIJ international*, 42(1), 53-62.
- [31] **Mommen Martijn**, Modelling of a Three-Phase Gas-Stirred Ladle, Tesis de maestría, KU LEUVEN. 2019, pp 8-15.
- [32] Gómez Rodríguez Ana Luisa, Implementación experimental de la técnica PLIF térmica en ollas agitadas con gas, Tesis de Licenciatura IQM, Facultad de Química, UNAM, 2020. Pp 25-35.
- [33] **Maldonado Daniel**, Modelación matemática de la transferencia de calor en ollas de acero agitadas con gas, Tesis de Maestría, Facultad de Química, UNAM, 2008, pp: 6-25.
- [34] **Jardón-Pérez, L. E., Amaro-Villeda, A., González-Rivera, C., Trápaga, G., Conejo, A. N., & Ramírez-Argáez, M. A.** (2019). Introducing the Planar Laser-Induced Fluorescence technique (PLIF) to measure mixing time in gas-stirred ladles. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(5), 2121-2133.

## 6 Apéndices

### Anexo A. Cálculo del Flux para el Modelo Matemático

El gas licuado de petróleo es una mezcla de hidrocarburos gaseosos a temperatura y presión ambiente cuya composición es de 60% propano y 40% butano. Se toma como base de cálculo un mol de mezcla y mediante el uso de las masas molares de cada compuesto se obtienen los **gramos de cada compuesto** presentes en este mol de mezcla como a continuación se muestra:

Base de cálculo: 1 mol de mezcla

$$0.4 \text{ mol } C_4H_{10} \left( \frac{58g \ C_4H_{10}}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} \right) = 23.2g C_4H_{10}$$

$$0.6 \text{ mol } C_3H_8 \left( \frac{44g \ C_3H_8}{1 \text{ mol } C_3H_8} \right) = 26.4g C_3H_8$$

Una vez calculados los gramos de cada compuesto se realiza la suma para obtener la masa total presente en el mol de mezcla:

$$\text{Total: } 23.2g C_4H_{10} + 26.4g C_3H_8 = 49.6 \text{ g de mezcla}$$

Posteriormente, para el cálculo de la **fracción masa** se dividen los gramos obtenidos de cada compuesto entre el total como se describe a continuación:

$$\frac{23.2g \ C_4H_{10}}{49.6g \ \text{Totales}} = 0.47$$

$$\frac{26.4g \ C_3H_8}{49.6g \ \text{Totales}} = 0.53$$

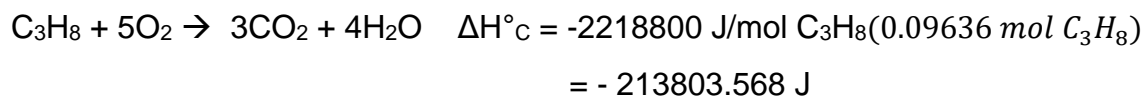
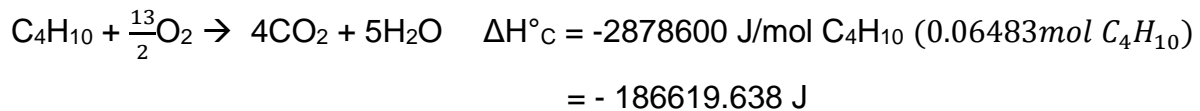
Después de haber pesado antes y después el tanque del quemador de gas utilizado se hace un promedio de la mezcla de gas perdida durante los 10 minutos de experimento dando un delta promedio de masa de mezcla perdida de 8g. Finalmente, después de aplicar una conversión con el uso de la masa molar y multiplicando por la fracción masa se obtienen los moles consumidos de cada compuesto en la mezcla. Lo anterior se describe en la operación de abajo:

$$8g_{mezcla} (0.47) \left( \frac{1 \text{ mol } C_4H_{10}}{58g \ C_4H_{10}} \right) = 0.06483 \text{ mol } C_4H_{10}$$

$$8g_{mezcla}(0.53) \left( \frac{1 \text{ mol } C_3H_8}{44g C_3H_8} \right) = 0.09636 \text{ mol } C_3H_8$$

### *Cálculo del calor de combustión adiabático*

Una vez que se conoce la energía que se libera por cada mol de hidrocarburo, esta se multiplica por los moles reaccionados durante la combustión contemplando una flama adiabática y se suma la energía liberada dando la energía total que la mezcla de hidrocarburos genera:



**Calor total: -400423.206 J**

### *Cálculo para el Flux suministrado por la flama*

Para calcular el Flux suministrado por la flama se calcula el área aproximada que la flama genera sobre la superficie del agua como se muestra en el cálculo abajo descrito, de esta forma se utiliza el diámetro de la boquilla del quemador, siendo este de 0.014m.

$$\text{Área de la tapa: } \pi * (0.007m)^2 = \mathbf{1.54 \times 10^{-4} m^2}$$

Ahora bien, contemplando una eficiencia de la flama del 100% para calcular el Flux suministrado se divide el calor de combustión de la flama adiabática entre el producto del área de la tapa por el tiempo de experimento siendo estos de  $1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  y de 600 segundos, respectivamente.

$$q = \frac{J}{m^2s} = \frac{\text{Calor combustión}}{\text{Área} * \text{tiempo}} = \frac{400423.206 \text{ J}}{(1.54e - 4m^2)(600s)} = \mathbf{4333584.481 W/m^2}$$

### *Pérdidas de Energía*

Para el cálculo de las pérdidas de energía es necesario conocer el volumen de agua presente en el modelo físico, de esta manera se utiliza la altura del nivel de agua y el diámetro del modelo físico siendo estos de 0.17m y 0.189m, respectivamente.

$$Vol = \pi * R^2 * H = \pi * (0.0945m)^2 * 0.17m = \mathbf{4.77 \times 10^{-3} m^3}$$

## Anexo B. Solución del Modelo Matemático en el software CFD ANSYS FLUENT 19.0

### B.1 Setup

Se describe la naturaleza del sistema a resolver, se definen los materiales a utilizar, así como las ecuaciones gobernantes del modelo. Se debe tomar en cuenta que para resolver la ecuación de conservación de momentum, de fracción de volumen y el modelo de turbulencia se empleó un estado estable y posteriormente, para resolver la ecuación de conservación de energía se utilizó el estado transitorio.

### Dinámica de Fluidos

#### B.1.1 General

En este punto se selecciona el estado estable, se activa la gravedad y se le da el eje de referencia. En la Figura B1 se muestran los parámetros ajustados para la resolución del sistema en estado estable.

**General**

Mesh

Scale... Check Report Quality

Display...

Solver

Type  Pressure-Based  Density-Based

Velocity Formulation  Absolute  Relative

Time  Steady  Transient

Gravity Units...

Gravitational Acceleration

X (m/s2) 0 P

Y (m/s2) 0 P

Z (m/s2) -9.81 P

Help

Figura B1. Ventana *Setup-General*.

### B.1.2 Materials

Se selecciona la ventana *Create/Edit Materials* material y se agrega un nuevo material (agua líquida) al fluido, como se describe en las Figuras B2 y B3.

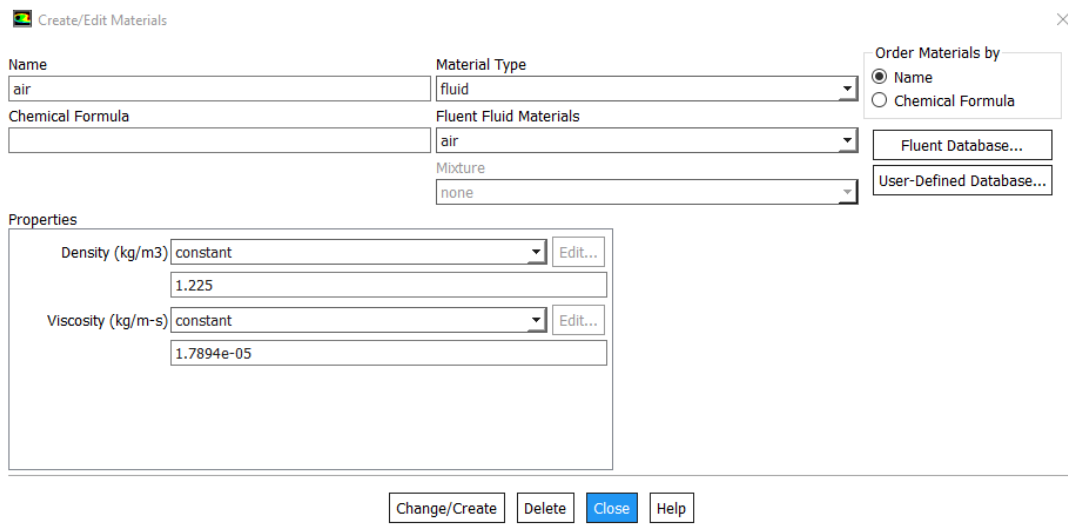
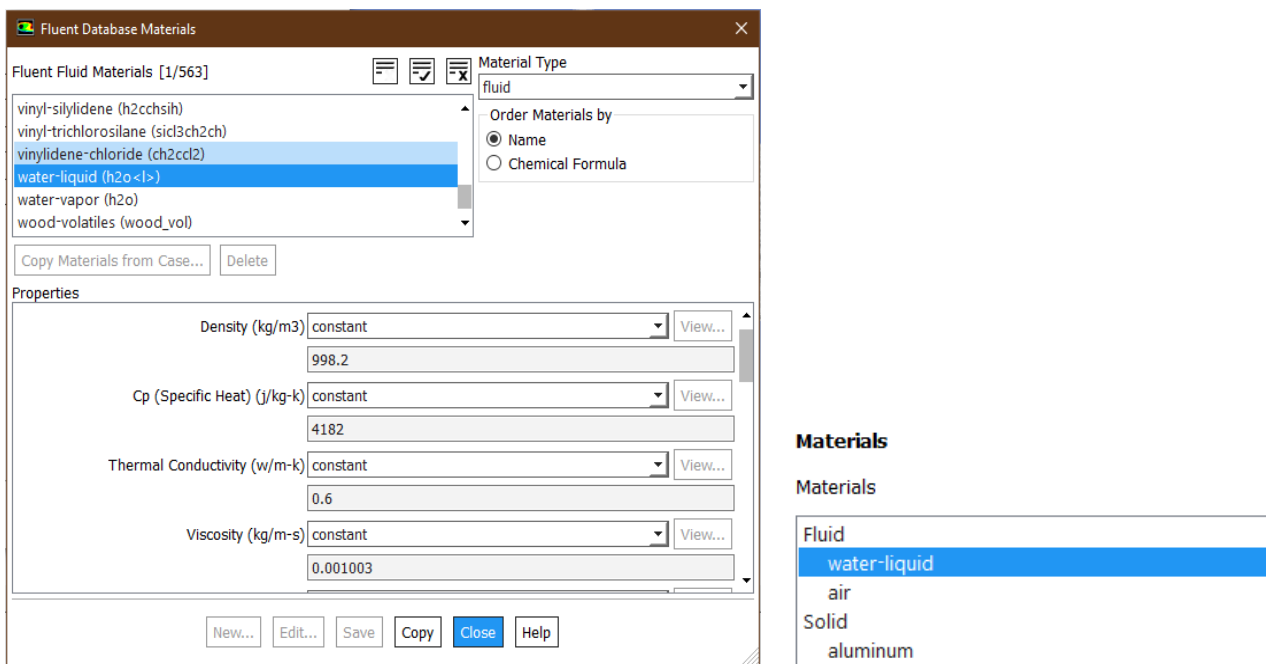


Figura B2. Ventana *Create/Edit Materials*.



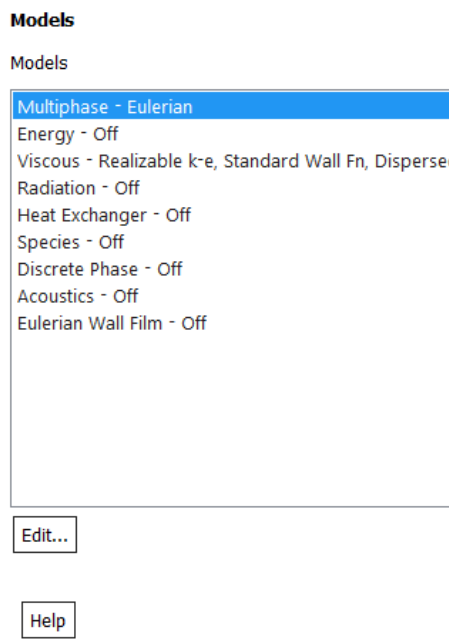
a) Ventana *Fluent Database Materials*

b) Ventana *Materials*

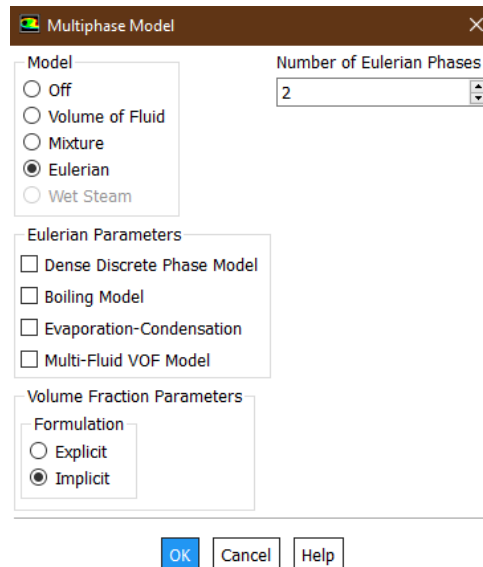
Figura B3. Ventanas sección *Create/Edit Materials*.

### B1.3 Models

Se definen las ecuaciones a resolver como se muestra en la Figura B4, se selecciona *Multiphase* para elegir el modelo multifásico Euler y 2 como número de fases con una formulación implícita.



a) Ventana *Models*.



b) Ventana *Multiphase Model*.

Figura B4. Ajuste de parámetros sección *Models*.

### B1.4 Viscous

La Figura B5 define el modelo  $k-\epsilon$  Realizable con funciones de pared estándar (Estándar Wall Functions) y un modelo de dispersión turbulenta multifásica (Turbulence Multiphase Dispersed Model). Únicamente se modifica el número de Prandtl a 0.05 mientras que los demás valores permanecen constantes.

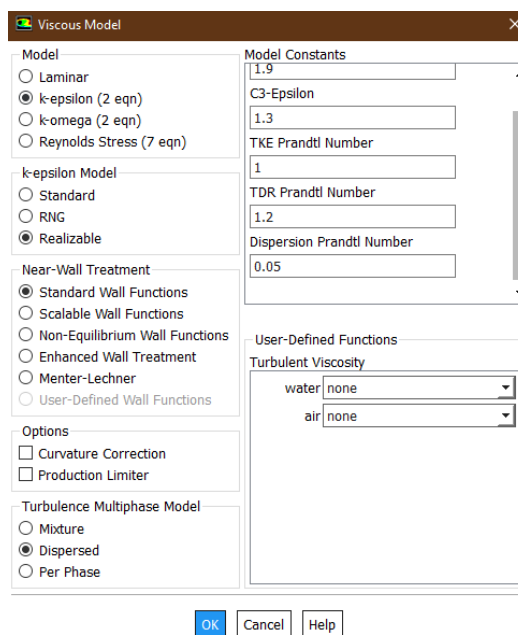
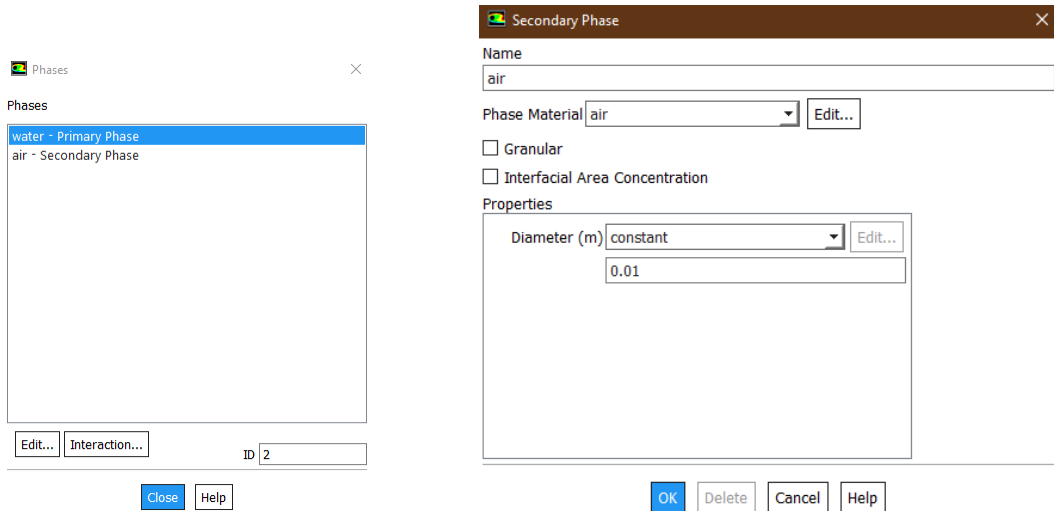


Figura B5. Ventana *Viscous Model*.



## B1.5 Phases

Una vez definidos los materiales es posible definir como fase primaria al agua y como fase secundaria al aire como se muestra en la Figura B8 y al seleccionar la ventana *Secondary Phase* se define un diámetro constante de 0.01m, Figura B6.



a) Ventana *Phases*.

b) Ventana *Secondary Phase*.

Figura B6. Ajuste de parámetros sección *Phases*.

Posteriormente, en la ventana *Phase Interactions* (Figura B7) se definen las interacciones entre las fases (masa virtual-virtual mass, fuerza de arrastre-drag e interacción turbulenta-turbulent interaction) los parámetros seleccionados se describen en la Tabla B1.

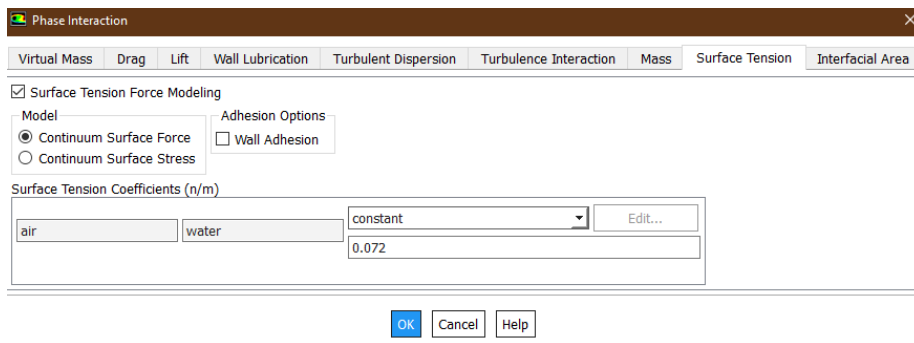


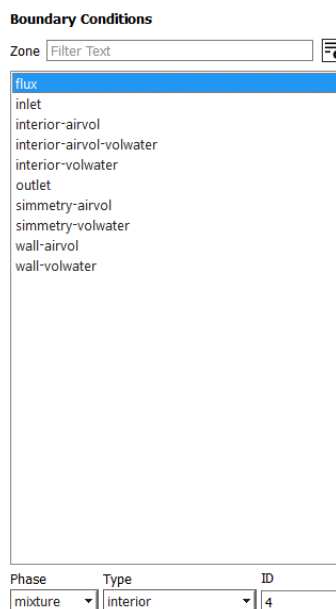
Figura B7. Ventana *Phase Interaction*.

Tabla B1. Ajuste de parámetros de la ventana *Phase Interaction*.

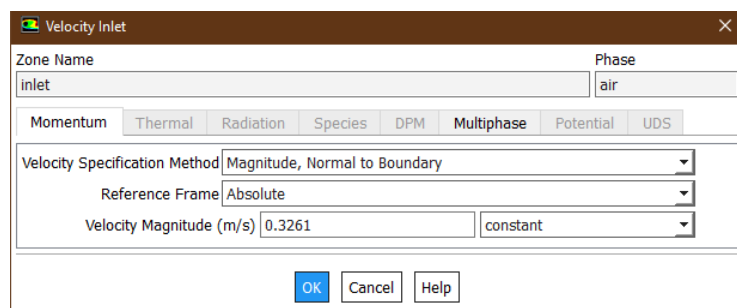
Interacción	Parámetro
Masa Virtual – Virtual Mass Coefficient	None
Fuerza de arrastre – Drag	Symmetric
Lift	None
Dispersión Turbulenta - Turbulent Dispersion	None
Interacción Turbulenta - Turbulence Interaction	Throshko – Hassan
Tensión Superficial – Surface Tension	Continuum Surface Force Surface Tension Coefficient: 0.072
Área Interfacial – Interfacial Area	ia – particle

### B 1.6 Boundary Conditions

En esta sección se definen las condiciones de frontera, como la Figura B8 a) lo muestra, el Flux se toma como un interior, más adelante se observará que esta condición cambia al activar la ecuación de energía. Para la entrada de aire, en la pestaña de *Momentum* se ajustan los parámetros como lo muestra la Figura B8 b), mientras que en la pestaña de *Multiphase* se ajusta la fracción de volumen de aire con un valor de 1. Finalmente, para la salida – *Outlet* de aire, se selecciona el parámetro de *Backflow volumen fraction* con un valor de 1.



a) Ventana general *Boundary Conditions*



b) Ventana *Velocity Inlet*.

Figura B8. Ajuste de parámetros sección *Boundary Conditions*

## B2 Solution

Es la sección en la cual se definen tanto las tareas de cálculos que son: reporte de residuales, definición de criterios de convergencia así como los métodos de solución.

### B2.1 Solution Methods

En esta ventana se definen los métodos de discretización espacial así como los métodos de resolución, a pesar de seleccionarse el caso estable al inicio del caso, en este punto del árbol es necesario activar la opción *pseudo-transient*, como lo muestra la Figura B9, donde se aprecian los métodos de solución seleccionados para converger el caso bajo estudio.

**Solution Methods**

Pressure-Velocity Coupling

Scheme  
Coupled

Coupled with Volume Fractions

Solve N-Phase Volume Fraction Equations

Spatial Discretization

Gradient  
Least Squares Cell Based

Momentum  
Second Order Upwind

Volume Fraction  
Modified HRIC

Turbulent Kinetic Energy  
Second Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate  
Second Order Upwind

Transient Formulation

Non-Iterative Time Advancement

Frozen Flux Formulation

Pseudo Transient

Warped-Face Gradient Correction

High Order Term Relaxation

Figura B9. Ventana *Solution Methods*.

### B2.2 Solution Controls

En esta ventana se ajustan los valores numéricos de los factores de relajación específicamente del modelo pseudo – transitorio. Tanto para el caso axisimétrico como para el excéntrico como se muestra en la Figura B10.

**Solution Controls**  
Pseudo Transient Explicit Relaxation Factors

Pressure  
0.1

Momentum  
0.1

Density  
0.1

Body Forces  
0.1

Volume Fraction  
0.1

Turbulent Kinetic Energy  
0.1

Turbulent Dissipation Rate  
0.1

Turbulent Viscosity  
0.1

Default

Equations... Limits... Advanced...

a) Inyección axisimétrica.

**Solution Controls**  
Pseudo Transient Explicit Relaxation Factors

Pressure  
0.5

Momentum  
0.5

Density  
0.5

Body Forces  
0.5

Volume Fraction  
0.5

Turbulent Kinetic Energy  
0.5

Turbulent Dissipation Rate  
0.5

Turbulent Viscosity  
0.5

Default

Equations... Limits... Advanced...

b) Inyección excéntrica.

Figura B10. Ventanas *Solution controls*.

### B2.3 Initialization

En esta sección se dejan todos los valores por default y únicamente se modifica el volumen de fracción de aire a un valor de 1 (Figura B11 a). Posteriormente, una vez inicializada la solución, se selecciona el botón *Mark/Adapt Cells* y luego *Region* (Figura B11 b) donde se selecciona el dominio físico que el aire tendrá.

**Solution Initialization**

Initialization Methods  
 Hybrid Initialization  
 Standard Initialization

Compute from

Reference Frame  
 Relative to Cell Zone  
 Absolute

Initial Values

Initial Turbulent Kinetic Energy (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)  
1

water Turbulent Dissipation Rate (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)  
1

air X Velocity (m/s)  
0

air Y Velocity (m/s)  
0

air Z Velocity (m/s)  
0

air Volume Fraction  
0

Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

a) Ventana *Solution Initialization*.

**Region Adaption**

Options  
 Inside  
 Outside

Shapes  
 Hex  
 Sphere  
 Cylinder

Input Coordinates

X Min (m) X Max (m)  
-0.095 0.095

Y Min (m) Y Max (m)  
0 0.095

Z Min (m) Z Max (m)  
0.1698 0.23

Manage... Controls...

Select Points with Mouse

Adapt Mark Close Help

b) Ventana *Region Adaption*.

Figura B11. Ajustes ventanas *Initialization*

A continuación, se selecciona el botón de *Patch* y se ajustan los valores como lo muestra la Figura B12.

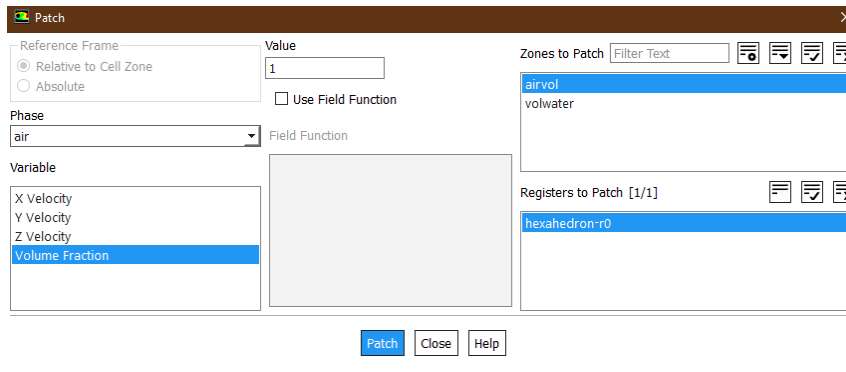


Figura B12. Ventana *Patch*.

#### B2.4 Creación de Monitor

Para determinar el momento en el que el sistema alcanza el estado estable, se utiliza la creación de una superficie (Figura B13) la cual funciona como un monitor de velocidad de agua en el que, en cuanto la velocidad se mantiene constante se puede concluir que el modelo numérico ha convergido.

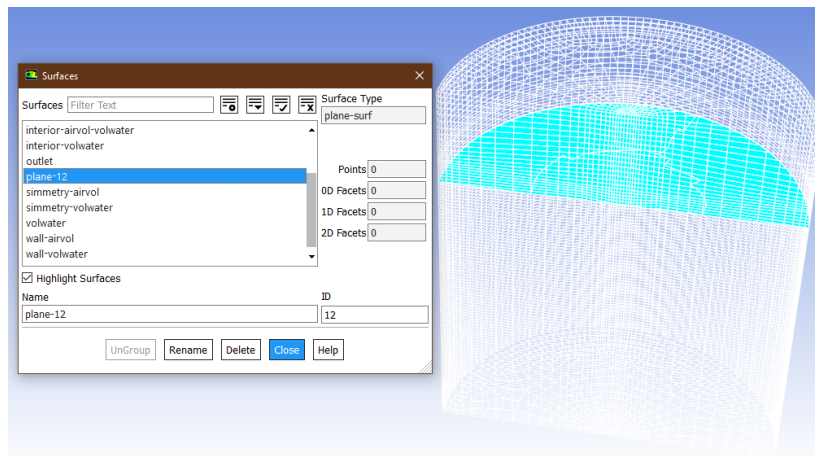


Figura B13. Ventana *Surfaces*.

Luego entonces, mediante el uso de la sección *Monitors* se crea el reporte del monitor de velocidad de agua a través de seleccionar la ventana de *Edit Report Plot* como lo muestra la Figura B14 y dando clic en la pestaña *New*. A continuación, en la ventana de *Surface Report Definition* (Figura B15 a) se ajusta el tipo de reporte a *Area-Weighted Average* y se selecciona el plano creado como superficie de medición de la variable *velocidad de agua*. Finalmente en la sección *Calculation Activities* se hace un guardado automático del caso cada 1000 iteraciones como se observa en la Figura B15 b).

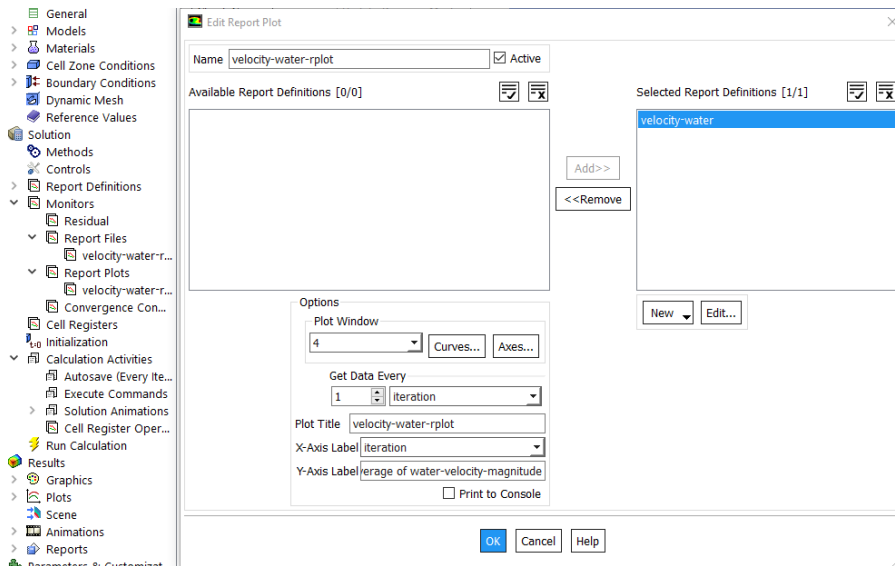
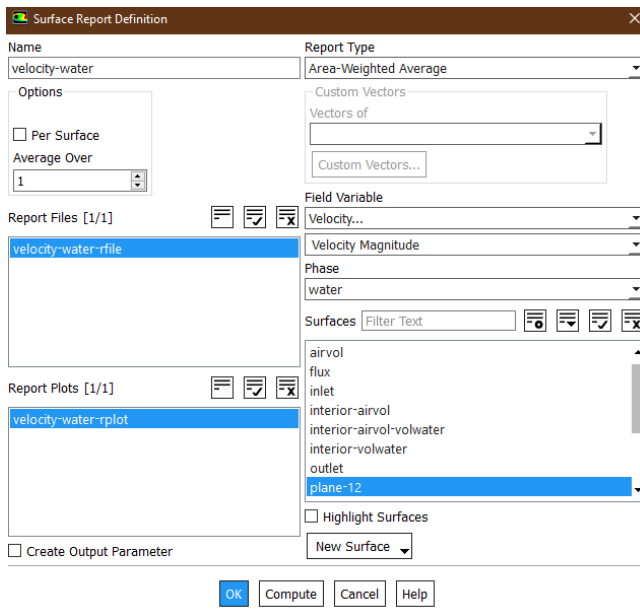
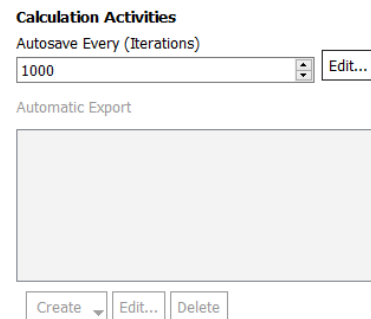


Figura B14. Ventana *Edit Report Plot*.



a) Ventana *Surface Report Definition*



b) Ventana *Calculation Activities*

Figura B15. Ventanas para creación de monitor.

## B2.5 Run Calculation

En esta sección se seleccionó el número de iteraciones de 12000 para el modelo céntrico y de 14000 para el modelo excéntrico y se ajusta el tamaño del factor de escala de tiempo a 0.1 como lo muestran las Figuras B16 a) y b).

The screenshot shows the 'Run Calculation' dialog box. At the top, there are buttons for 'Check Case...' and 'Update Dynamic Mesh...'. Below this is the 'Pseudo Transient Options' section, which includes 'Fluid Time Scale' with 'Time Step Method' set to 'Automatic' and 'Timescale Factor' set to '0.1'. The 'Length Scale Method' is set to 'Conservative' and 'Verbosity' is set to '0'. Below this, 'Number of Iterations' is set to '12000' and 'Reporting Interval' is set to '1'. 'Profile Update Interval' is also set to '1'. There are buttons for 'Data File Quantities...', 'Acoustic Signals...', and 'Acoustic Sources FFT...'. At the bottom, there are 'Calculate' and 'Help' buttons.

a) Inyección céntrica.

The screenshot shows the 'Run Calculation' dialog box for an eccentric injection model. The settings are identical to the centric model, but the 'Number of Iterations' is set to '14000'.

b) Inyección excéntrica.

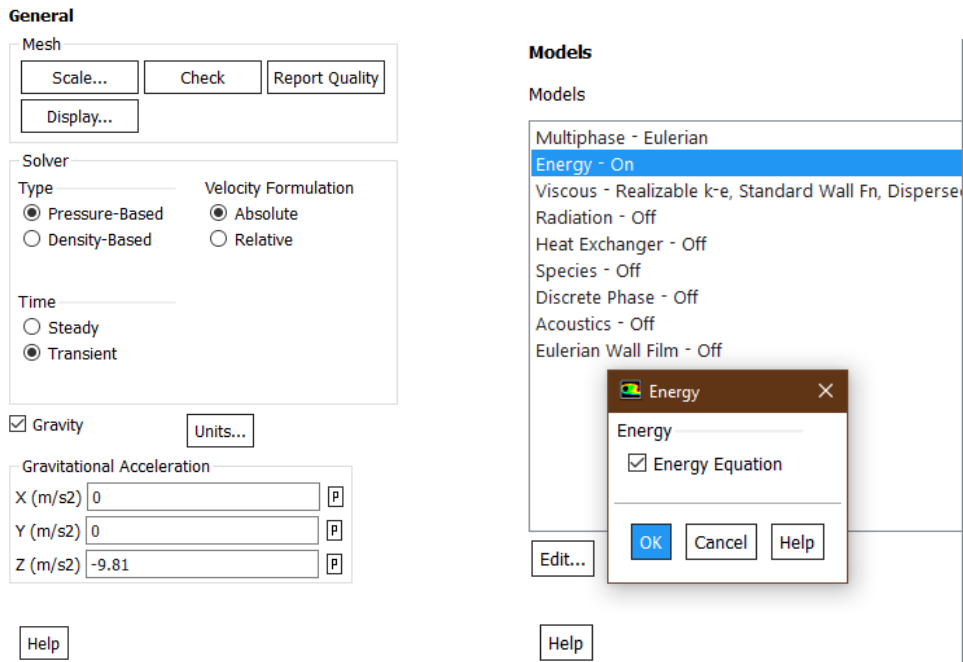
Figura B16. Ventanas *Run Calculation* para inyección céntrica y excéntrica.

## Conservación de energía

En este momento de la simulación se pasa del estado estable al estado transitorio para modelar el calentamiento del agua a través del tiempo mediante una superficie con un flux constante.

### B3.1 General & Models

Únicamente se modifica el botón *Time* a *Transient*, (Figura B17 a) todos los demás factores permanecen constantes. Para el caso de la sección *Models* se activa la ecuación de energía como lo muestra la Figura B17 b).



a) Ventana *Setup-General*.

b) Ventana *Models*.

Figura B17. Ajustes de parámetros secciones *General & Models*.

En la sección *Viscous Model* aparece un nuevo parámetro *Energy Prandtl Number*, (Figura B18) el cual no recibe modificación alguna.

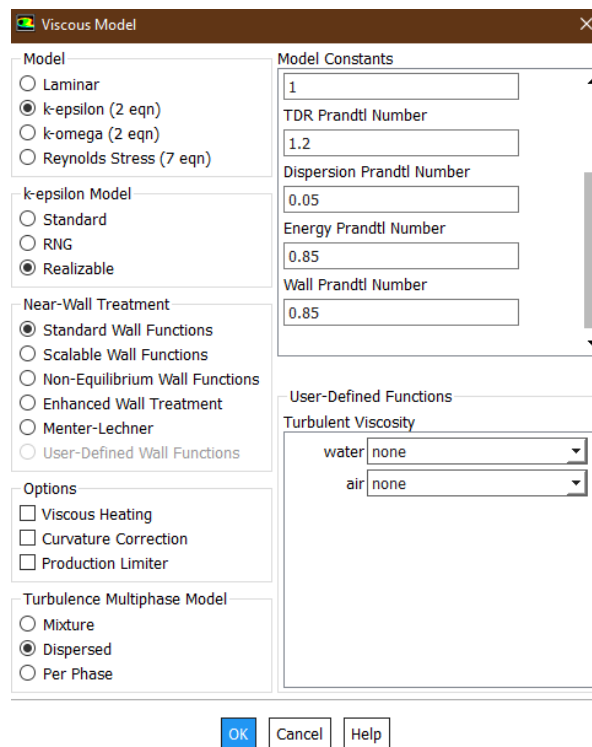
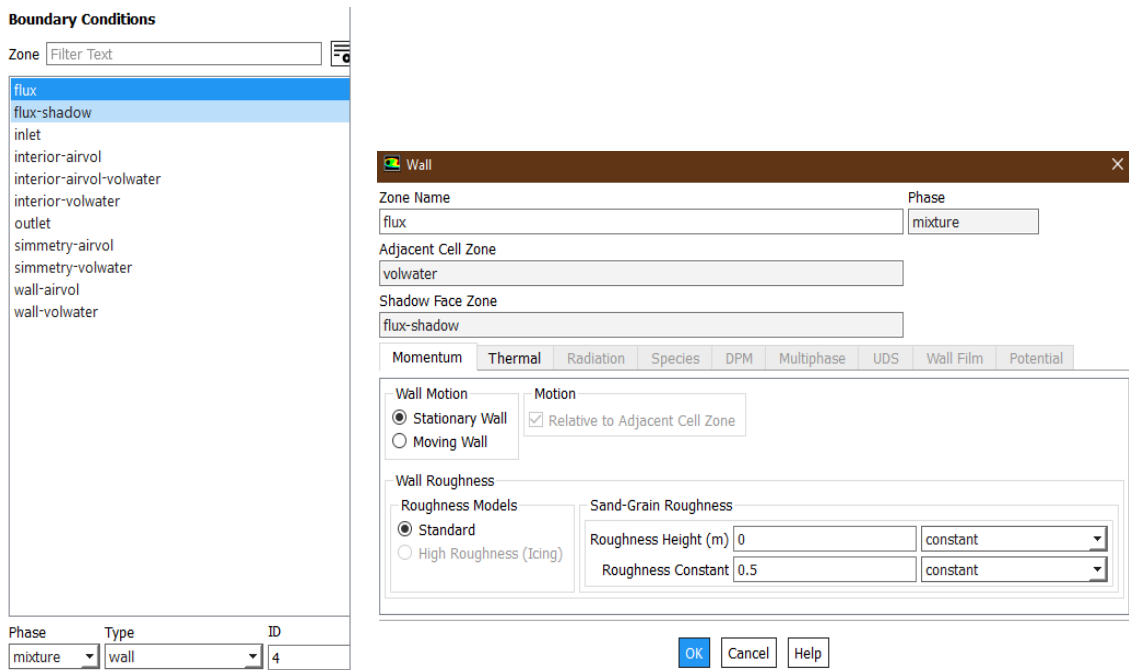


Figura B18. Ventana *Viscous Model*.



### B3.2 Boundary Conditions

Es importante observar que a comparación de la Figura B8 en la sección B1.6 la Figura B19 muestra que la condición de frontera *Flux* pasa de ser interior a una pared. Asimismo, la Figura B19 b) y B20 muestra el ajuste de los parámetros utilizados en dicha condición de frontera, de esta forma, la sección *Momentum* no se modifica mientras que en la pestaña *Thermal* se selecciona el botón *Heat Flux* y se introduce el valor del Flux previamente calculado siendo este constante.



a) Ventana *Boundary Conditions*

b) Ventana *Wall-Momentum*.

Figura B19. Ajustes de parámetros de la sección *Boundary Conditions*.

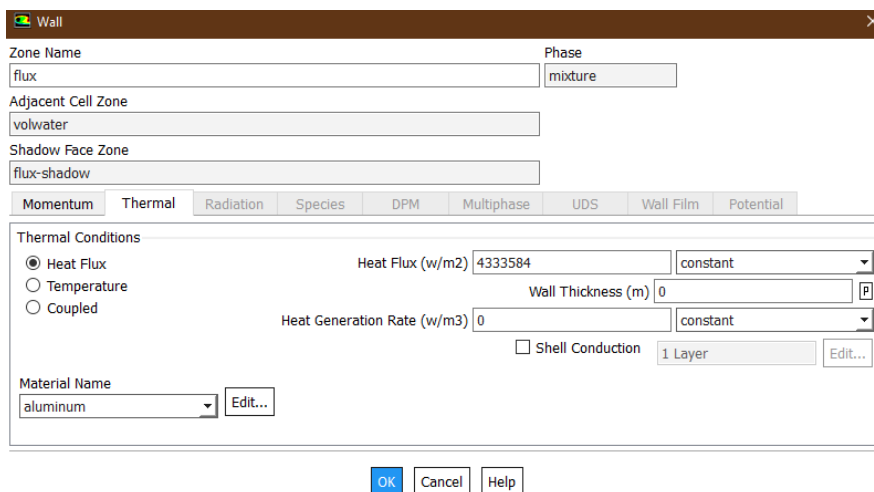


Figura B20. Ventana *Wall-Thermal*.

### B3.3 Methods & Solution Controls

En esta sección se modifican los botones *Energy* con un *Second Order Upwind* y *Transient Formulation* también con un *Second Order Implicit*, esto se observa en la Figura B21.

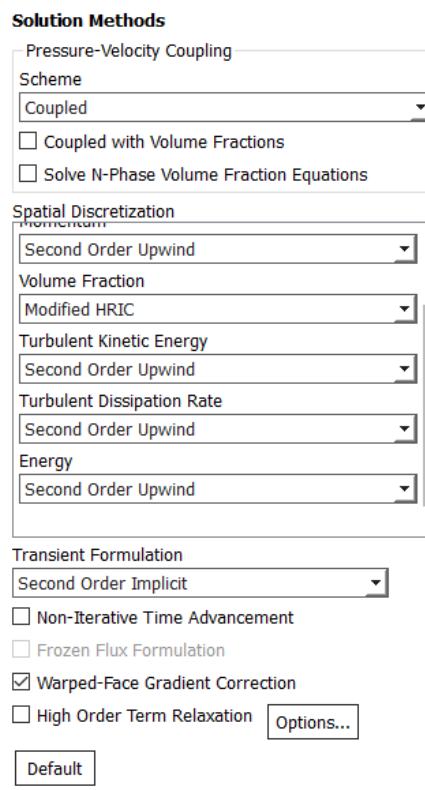


Figura B21. Ventana *Solution Methods*.

Como lo muestran las Figuras B22 a) y B22 b) solamente se modifica el factor de relajación de energía, para el modelo céntrico y excéntrico con 1 y 0.95, respectivamente. Además, en la ventana *Ecuations* se desactivan las ecuaciones de flujo, fracción de volumen y turbulencia para resolver solo la de energía (Figura B22 c).

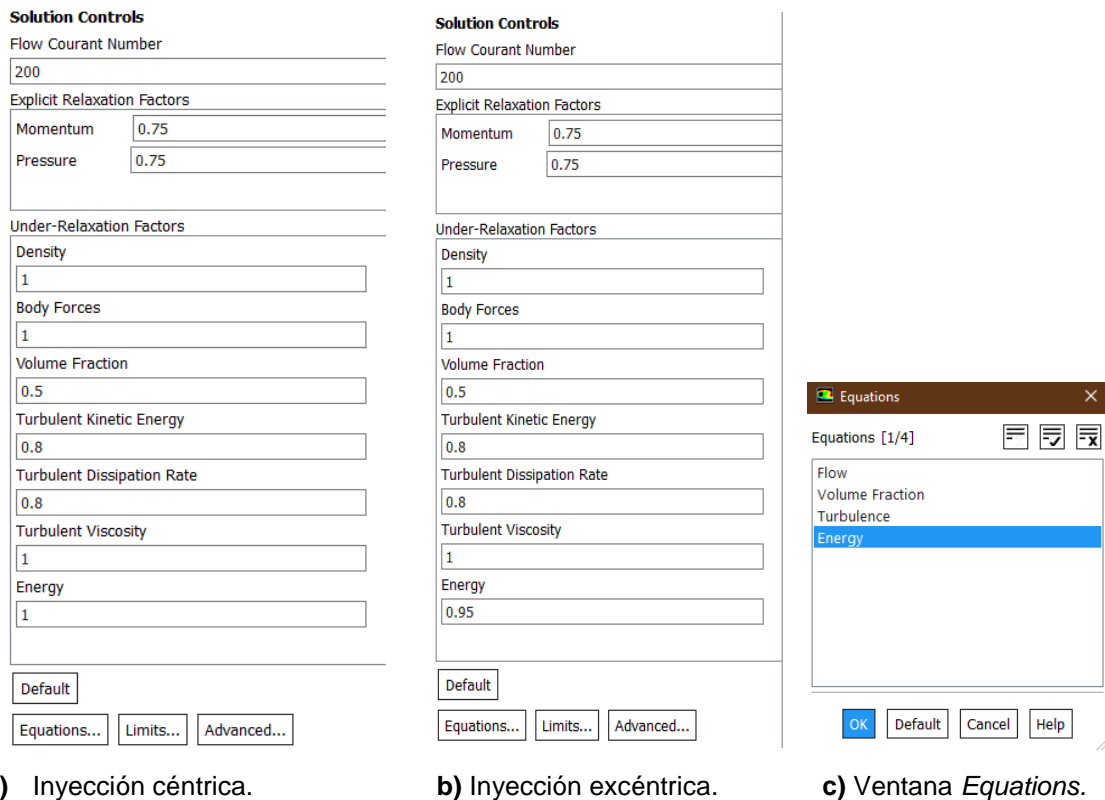


Figura B22. Ajuste de parámetros sección *Solution Controls*.

### B3.4 Creación de Monitores

De manera análoga a la sección B2.4, se crean las superficies que funcionan como termopares en el modelo numérico en la ventana *Surfaces*. La posición de los puntos creados varía para cada modelo. La Figura B23 muestra la disposición de los puntos creados tanto para el modelo céntrico como para el excéntrico, dependiendo del plano de medición.

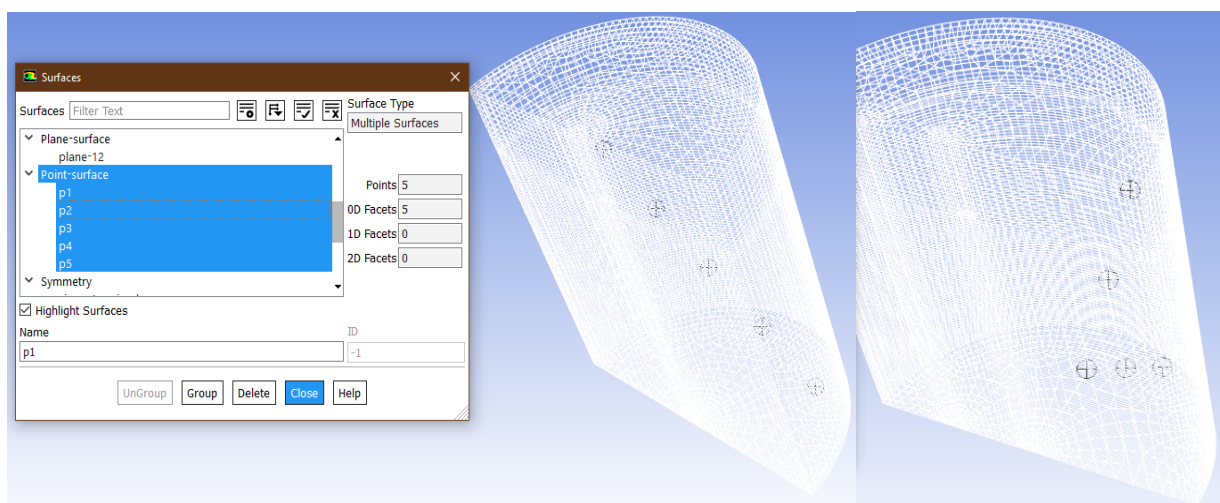


Figura B23. Ventana *Surfaces*.

Se selecciona la pestaña *Edit Report File* (Figura B24) y a continuación se crea un nuevo monitor en el botón *New* aparece la ventana *Surface Report Definition* en donde se modifica el tipo de reporte a *Area-Weighted Average* y como variable se mide a la temperatura, esto se muestra en la Figura B25. Esto se realiza para cada punto creado y de esta forma comparar la información obtenida mediante los termopares colocados en el modelo físico con respecto a los resultados del modelo matemático.

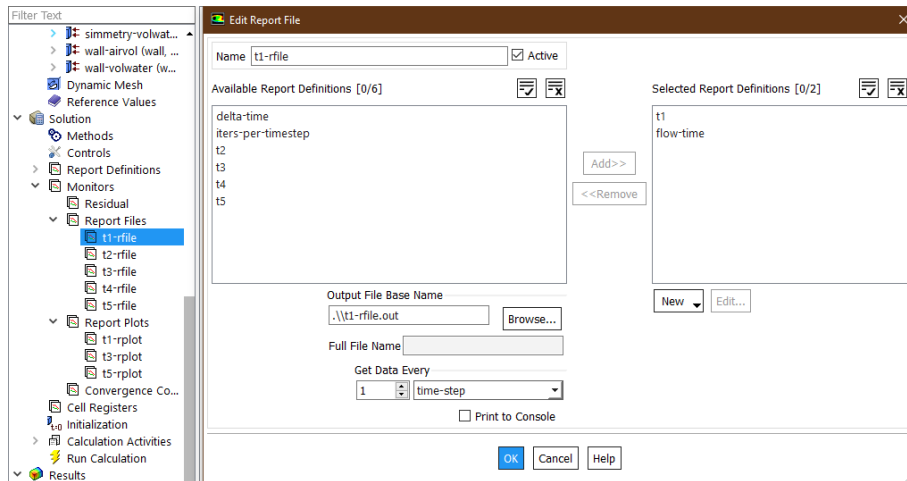


Figura B24. Ventana *Edit Report File*.

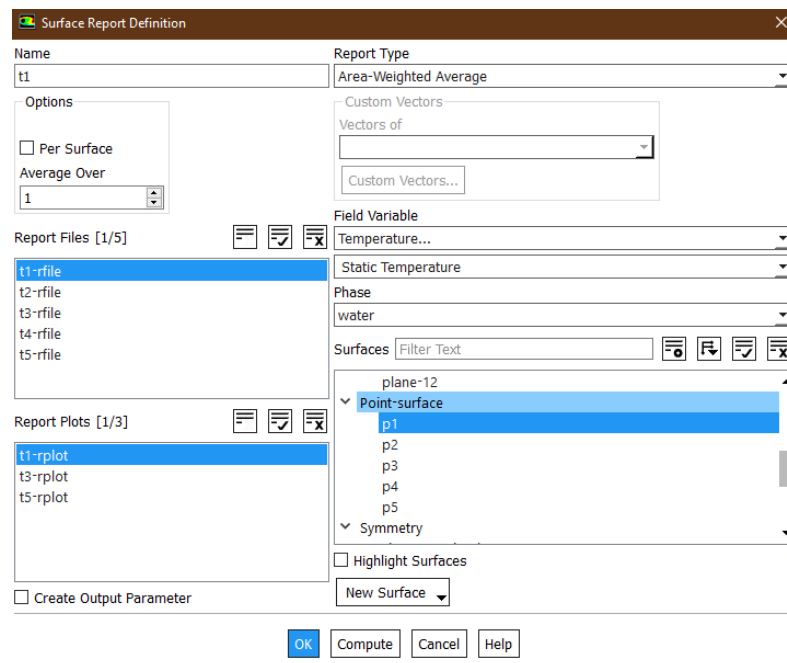


Figura B25. Ventana *Surface Report Definition*.

### B3.5 Solution Initialization & Run Calculation

En la sección *Initialization* (Figura B26) se modifica la temperatura inicial de 300K a 299K para que exista concordancia entre la medición inicial experimental con la del modelo numérico.

**Solution Initialization**

Initialization Methods

Hybrid Initialization

Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

Relative to Cell Zone

Absolute

Initial Values

water Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)

1

water Temperature (k)

299

air X Velocity (m/s)

0

air Y Velocity (m/s)

0

air Z Velocity (m/s)

0

air Volume Fraction

0

Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

Figura B26. Ventana *Solution Initialization*.

Finalmente, en la sección *Run Calculation* se elige un paso de tiempo de 0.1 con 25 iteraciones en cada paso de tiempo y el número de pasos de tiempo utilizados tanto para el modelo céntrico como para el excéntrico fue de 6000 y 6650, tal como lo muestra la Figura B27.

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 0.1

Settings... Number of Time Steps: 6000

Options

Extrapolate Variables

Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...

Time Sampled (s): 0

Solid Time Step

User Specified

Automatic

Max Iterations/Time Step: 25 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals... Acoustic Sources FFT...

Calculate

Help

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 0.1

Settings... Number of Time Steps: 6650

Options

Extrapolate Variables

Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...

Time Sampled (s): 0

Solid Time Step

User Specified

Automatic

Max Iterations/Time Step: 25 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals... Acoustic Sources FFT...

Calculate

Help

**a)** Inyección céntrica.

**b)** Inyección excéntrica.

Figura B27. Ventanas *Run Calculation* para inyección céntrica y excéntrica.