



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
TÉCNICA PLIF TÉRMICA EN OLLAS AGITADAS
CON GAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA
ANA LUISA GÓMEZ RODRÍGUEZ**



CDMX

2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: Arturo Alejandro Sánchez Santiago

VOCAL: Adrián Manuel Amaro Villeda

SECRETARIO: Marco Aurelio Ramírez Argáez

1er. SUPLENTE: José Alfredo Delgado Álvarez

2do. SUPLENTE: Luis Enrique Jardón Pérez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio 203, Edificio D, Facultad de Química, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez _____

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. en I. Luis Enrique Jardón Pérez _____

SUSTENTANTE:

Ana Luisa Gómez Rodríguez _____

Agradecimientos

Agradezco a DGAPA-PAPIIT por el apoyo económico brindado al proyecto "Determinación de tiempo de mezclado en ollas agitadas con gas mediante modelado matemático y físico con PLIF" para la realización de esta tesis; llevada a cabo bajo la tutela del Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

Índice

Resumen	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 Fabricación primaria	2
1.1.2 Refinación secundaria	6
1.2 Revisión de la bibliografía	10
1.2.1 Modelado matemático	10
1.2.2 Mediciones experimentales.....	11
1.2.3 Modelado físico	11
1.2.4 Horno Olla.....	14
1.2.5 PLIF térmico	22
1.3 Hipótesis.....	25
1.4 Objetivo general.....	25
1.4.1 Objetivos particulares	25
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	26
2.1 Modelado físico	26
2.2 Procedimiento de PLIF Térmico aplicado	27
2.2.1 Técnica de Medición del PLIF (<i>TM PLIF</i>)	38
2.3 Determinación de variables	41
2.3.1 Análisis preliminar de sensibilidad térmica	41
2.3.2 Análisis preliminar de concentración de Rodamina B	45
2.4 Calibración	49
2.5 Calentamiento agitado con gas	54
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
3.1 Calibración	59
3.2 Validación de la técnica	61
3.3 Evolución térmica del calentamiento agitado con gas	65
3.3.1 Inyección axisimétrica.....	65
3.3.2 Inyección excéntrica	71
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	80

Resumen

En los últimos años, el avance de la tecnología ha requerido también un incremento en la calidad del acero, lo cual, es llevado a cabo principalmente en el Horno Olla. Una de las funciones de esta unidad es efectuar el mezclado térmico del acero líquido mediante la inyección de un gas inerte (Ar/N₂). Gracias a esto, el baño de acero se encuentra en condiciones térmicas óptimas para pasar al proceso de colada continua.

En el presente trabajo se buscó implementar la técnica PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence o Luminiscencia Inducida con Láser Plano) en un modelo físico del Horno Olla; la etapa de interés de este proceso fue la de mezclado térmico por burbujeo de agitación, la cual no ha sido ampliamente investigada. Esta técnica se sustenta en la propiedad de fluorescencia de algunas sustancias y tiene algunas ventajas de interés frente a otras técnicas en la medición de temperatura, como lo es el hecho de no ser intrusiva y generar mapas de temperatura instantáneos.

La implementación requirió de la estructuración del procedimiento de la técnica para ser empleada en un futuro. Se necesitó la determinación de algunas variables como concentración y escala del modelo; también se asentó el precepto de la necesidad de realización de curvas de calibración locales en una malla del plano cada que se realicen experimentos. La validación de la técnica requirió una comparación entre las temperaturas obtenidas con la técnica PLIF y las obtenidas por medio de la utilización de termopares, bajo las condiciones de calentamiento y agitación que se usan para el modelado físico del Horno Olla.

Es así como este estudio sienta las bases para el estudio la optimización de los parámetros que intervienen en el proceso del Horno Olla en futuros proyectos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acero forma parte primordial de la vida cotidiana de la población al encontrarse en muchos de los elementos necesarios para la vida. Debido a sus altas propiedades mecánicas, durabilidad, versatilidad y bajo costo relativo a otros materiales, es una elección recurrente para diversas aplicaciones.

Actualmente, la industria del acero se encuentra activa en todo el mundo, con un valor de producción total anual de 2.5 trillones de dólares; generando 13 empleos, a través de la cadena de suministro, por cada 2 empleos creados en el sector del acero; llegando a producir hasta 259.1 millones de empleos considerando servicios y proveedores [1].

En México se produjeron 20.2 millones de toneladas de acero de primera fusión en el 2018; siendo el 14° productor mundial de acero y representando el 2% del PIB nacional, el 6.9% del PIB industrial y el 12.9% del PIB manufacturero del país. La industria siderúrgica tiene una generación en el país de 672 mil empleos de acuerdo con CANACERO [2]. A pesar de pasar por un momento difícil en términos económicos tanto en México como en el resto del mundo [3], sigue siendo la materia prima más importante de la industria de la ingeniería y la construcción.

1.1.1 Fabricación primaria

El acero es una aleación Hierro-Carbono (Fe-C) que puede contener hasta 2% de Carbono en peso. La presencia de otros elementos puede considerarse como impurezas o elementos aleantes dependiendo el caso y su efecto sobre la aleación y sus propiedades (principalmente mecánicas); la variación de la presencia de estos elementos da lugar a la

existencia de una gran gama de tipos de acero para aplicaciones específicas.

El método de fabricación del acero se ha ido adaptando de acuerdo con las necesidades industriales y sociales, sobre todo desde el gran avance que hubo durante la segunda revolución industrial con la llegada del Convertidor Bessemer. La poca precisión en el control de la composición química final (dificultad de disminuir la presencia de Nitrógeno, por ejemplo) y la temperatura, la lentitud de los procesos y la energía externa requerida para el adecuado funcionamiento de ellos, ha llevado a la evolución de diferentes métodos de fabricación hasta arribar a los que actualmente es factible clasificar esencialmente en dos rutas: "Integrada" y "No integrada" [4], mostradas en la *Figura 1*.

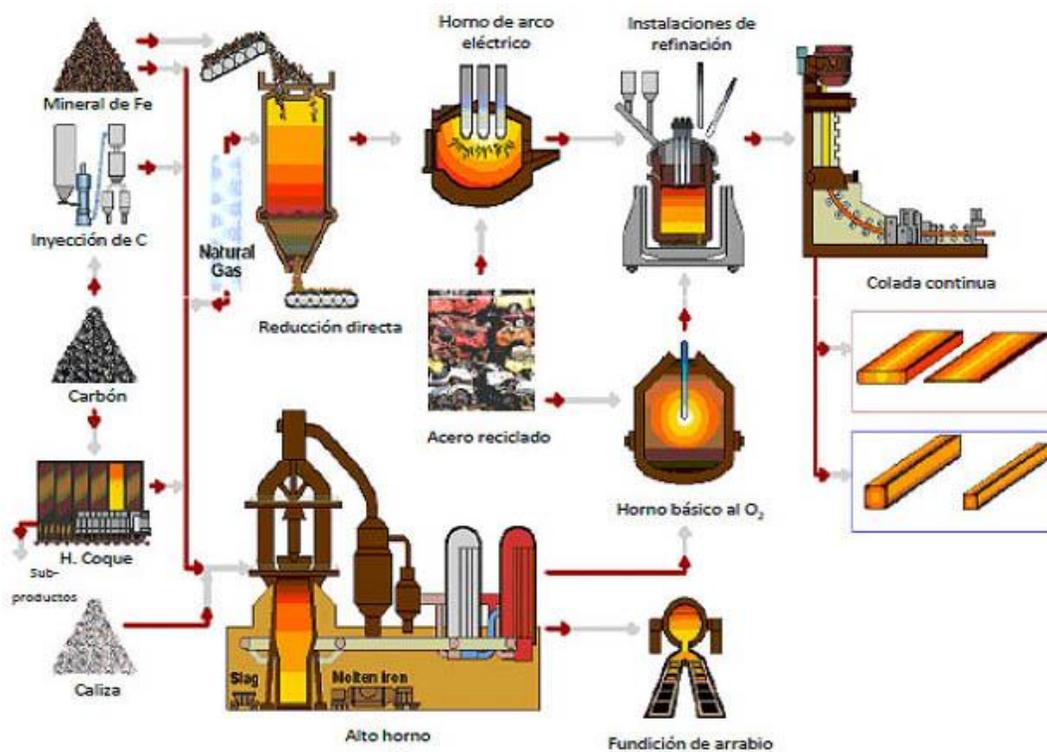


Figura 1. Esquema del proceso completo de producción del acero. Adaptado de [5].

Vía integrada (Alto Horno-BOF)

Este procedimiento consiste en la fabricación del acero a partir del mineral de Hierro. A continuación, se describen las rutas integradas Alto Horno-BOF y la ruta Reducción Directa-Horno de Arco Eléctrico, ambas como rutas integradas que parten de mineral de hierro.

- Pelletización: A partir de una mezcla de Fe_2O_3 (hematita) y Fe_3O_4 (Magnetita) se forman pellets de ½ pulgada que posteriormente son sinterizados.
- Alto Horno: Se realiza la carga de materias primas (pellets de hierro, carbón coquizado y piedra caliza) por la parte superior del alto horno inyectando aire enriquecido con O_2 (38-40%) para llevar a cabo la reducción del mineral. En este proceso el mineral es fundido y reducido para obtener arrabio, que es Fe líquido con alto contenido de Carbono (5-6%) e impurezas.
- Horno BOF: El arrabio pasa al horno BOF (Basic Oxygen Furnace u Horno Básico de Oxígeno) el cual es un convertidor de acero recubierto internamente de ladrillo refractario donde se busca eliminar el %C sobrante. En el BOF se inyecta a presión Oxígeno puro en el arrabio a través de una lanza produciendo un jet supersónico sobre el baño líquido, oxidando el C y formando CO. Adicionalmente oxida algunas impurezas cuyos productos terminan flotando en la escoria.

Vía integrada (Reducción Directa-Horno de Arco Eléctrico)

Este método también se basa en la fabricación del acero a partir de emplear mineral de hierro como materia prima principal.

- Pelletización: Sigue el mismo procedimiento que el mencionado para la vía integrada.

- Reducción directa: Es adecuado para materia prima con alta concentración de Fe (66 % en peso). A partir de la reducción en hornos de los pellets de mineral de Fe mediante el empleo de compuestos reductores tales como carbón, H₂ y CO, sin alcanzar la temperatura de fusión de ninguno de los componentes, se elimina el Oxígeno de los pellets para obtener Fe de alta porosidad (hierro esponja).
- Horno EAF: En el EAF (Electric-Arc Furnace u Horno de Arco Eléctrico) se lleva a cabo la adición de la chatarra. Este horno tiene estructura cilíndrica con 3 electrodos de grafito colocados en la parte superior que por medio de corriente alterna, produce un arco eléctrico que provee el calor necesario para fundir al hierro esponja. Generalmente este horno no funde 100% hierro esponja por lo que requiere del uso de chatarra de acero como materia prima. En esta etapa los pellets son añadidos, por su alta pureza, para diluir el contenido de Carbono en la mezcla. El tipo de acero fabricado por este medio dependerá de la calidad de la materia prima.

Vía NO integrada

Esta ruta también realiza la fabricación del acero, pero a partir de emplear únicamente chatarra de acero como materia prima principal sin usar material reducido, es decir sin requerir de los productos minerales de hierro, por lo que no integra ni la minería ni la fabricación de hierro primario (ironmaking) ya sea en Altos Hornos o en reactores de Reducción Directa, por lo que se denomina ruta NO integrada. En esta ruta se funde 100% chatarra de acero en Hornos de Arco Eléctrico. Las plantas basadas en esta ruta se hicieron populares en las décadas de los 70's y 80's del siglo pasado, y se les llamó en inglés "mini mills". La popularidad se debe a que se le dio un reuso a la chatarra de acero que abundaba en países industrializados, lo que a su vez implica un menor consumo de energía

con una producción más amigable en el medio ambiente y además un control mejor de la calidad del acero si se selecciona cuidadosamente la chatarra a ser cargada a este horno.

Cualquiera que sea la ruta de fabricación de acero primario, es decir, cualquiera de las dos rutas integradas o la no integrada, el acero al ser un material estructural requiere de un control estricto de su composición química, evitando impurezas nocivas para las propiedades mecánicas, por lo que es común pasar a la refinación secundaria del acero en Hornos Olla.

1.1.2 Refinación secundaria

El avance tecnológico en la fabricación del acero ha incrementado conforme al aumento de las demandas de la industria referentes a su calidad. Una vez que el acero fue fabricado por alguno de los métodos previamente expuestos, se requiere refinar el baño de acero por otros medios para eliminar impurezas indeseables y que van en detrimento de sus propiedades mecánicas, y dado que los requerimientos de control (necesarios para efectuar la colada continua) están más allá de la capacidad de los convertidores de acero.

Las impurezas dañinas en el acero son los sulfuros, fosfuros, el Oxígeno, Hidrógeno y Nitrógeno, los cuales ocupan espacios intersticiales en la estructura cristalina del Hierro. Los principales efectos de estas impurezas son la pérdida de ductilidad, resistencia al impacto y resistencia a la corrosión.

Las demandas en las características del acero conllevan: reducción de impurezas metálicas y no metálicas, menor variación de propiedades entre piezas solidificadas y mejor calidad y homogeneidad de superficie. Aunado a esto, también es imperante reducir costos, tener control en el ámbito de contaminación ambiental y estabilidad del mercado mundial del acero [6].

El Horno Olla, el reactor de interés en el presente trabajo, es la unidad más común para llevar a efecto la refinación secundaria [Figura 2]. La Olla (tanque cilíndrico) con el acero líquido es llevada a la estación del Horno Olla desde el convertidor de acero (BOF u Horno de Arco Eléctrico); una vez ahí, le es posicionada una tapa que protege el baño de la oxidación atmosférica, aunque no por completo y se introducen los electrodos de grafito para evitar que caiga la temperatura del baño líquido. En el Horno Olla, la desoxidación y el ajuste de composición química son llevados a cabo por medio de la adición de granallas de Aluminio (para la formación de óxidos) y ferroaleaciones respectivamente. Además, se lleva a cabo la desulfuración para lo cual se requiere de una escoria con alta capacidad para la absorción de esta impureza, lo cual se logra en condiciones reductoras y con escorias sintéticas reductoras conteniendo generalmente Carburo de Calcio (CaC_2).

El vaciar el acero líquido desde el horno de Arco Eléctrico o desde el BOF a la olla, según sea el caso, provoca un gradiente térmico por medio de la pérdida de temperatura y se induce la formación de una estratificación térmica (superposición del acero líquido más caliente sobre acero líquido más frío) [7]. Lo anterior es un inconveniente dado que una de las necesidades para la colada continua es que la temperatura del baño se encuentre lo más homogénea posible al momento de este ser vaciado en el "tundish" o distribuidor de la colada continua, ya que este tiene una ventana de temperatura de trabajo específica, un rango justo encima de la temperatura liquidus que es determinada por el tipo de acero a fabricar; en consecuencia, la temperatura del baño es ajustada por la acción de los electrodos y la estratificación térmica es corregida por medio de la inyección de gas, más comúnmente desde un tapón poroso de alúmina en el fondo, de una purga de Argón o Nitrógeno que agita el baño. Este flujo de gas genera un movimiento de recirculación en el acero líquido que

favorece la velocidad de reacción de desoxidación, desulfuración y el movimiento mecánico que genera favorece los procesos de mezclado químico y térmico previamente mencionados.

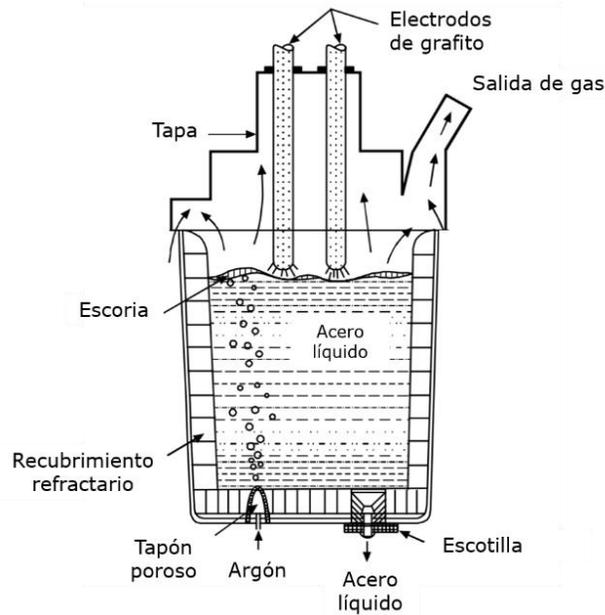


Figura 2. Esquema del Horno Olla. [6].

En la *Tabla 1* se presenta un compilado de diversas funciones de distintos procesos de refinación secundaria. Se observa que en el Horno Olla se pueden llevar a cabo casi todos los procesos exceptuando la descarburación y desgasificación, sin embargo, es común que se incorpore otra técnica para solventarlo (Desgasificador en vacío).

Tabla 1. Comparación de las funciones de diferentes unidades usadas en la refinación secundaria.

	VD	VOD	IGP	IM	VAD	LF
Desulfuración	↓	↓	↓	✓	✓	✓
Desoxidación	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Descarburación	↓	✓	X	X	X	X
Calentamiento	X	✓*	X	X	✓	✓
Aleación	↓	✓	↓	↓	✓	✓
Desgasificación	✓	✓	X	X	✓	X
Homogenización	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reducción de inclusiones	✓	✓	✓	✓	✓	✓

VD: Vacuum Degassing (Desgasificador en vacío), VOD: Vacuum Oxygen Decarburiser (Descarburación con Oxígeno al vacío), IGP: Inert Gas Purging in Ladle (Purga de gas inerte en Olla), IM: Injection Metallurgy (Inyección metalúrgica), VAD: Vacuum Arc Degassing (Desgasificador de acero en vacío), LF: Ladle Furnace (Horno Olla)

*Solo calentamiento químico.

↓: Acción realizada en menor proporción

El parámetro del mezclado en el Horno Olla ha sido ampliamente estudiado desde el punto de vista químico, sin embargo, no así desde el punto de vista térmico. La presencia de un fuerte gradiente térmico en el Horno Olla al momento de vaciar al distribuidor de colada continua puede llegar a generar defectos en las piezas por las diferentes condiciones de solidificación generadas; además, de llegar a interrumpir el proceso de colada continua si el baño no cumple con la temperatura requerida por el equipo al momento del vaciado.

La implementación de la técnica PLIF térmico permitirá estudiar el mezclado térmico en modelos físicos del Horno Olla para encontrar las mejores condiciones de mezclado, con la ventaja de obtener mapas de temperatura en lugar de lecturas puntuales como sucede con métodos tradicionales (termopares o termómetros) y sin ser una técnica invasiva que perturbe la dinámica de fluidos, tratando de este modo tener condiciones apegadas lo más posible a la realidad. Además, los resultados experimentales con esta técnica, que nunca se ha reportado en modelos

físicos de ollas agitadas con gas, servirán para validar modelos matemáticos en cuanto a la transferencia de energía en la olla.

1.2 Revisión de la bibliografía

Las investigaciones acerca del Horno Olla se han llevado a cabo empleando modelos, dado que las condiciones de operación con hornos masivos operando a 1600°C hacen muy difícil realizar experimentación en las plantas de acero. Estos modelos en ingeniería son una representación del sistema de estudio mediante el empleo de diferentes herramientas que permiten aproximar el comportamiento de este a lo que sucedería en realidad. El tipo de modelo empleado se puede clasificar en dos categorías principalmente: modelado matemático y modelado físico. El desarrollo de ambos ámbitos es de gran importancia ya que la utilización de estos en conjunto sirve para validar los resultados obtenidos ya sea por un medio o por otro. Aunado a esto, en ocasiones se ha hecho uso de las mediciones experimentales directamente en el proceso o en plantas piloto que, de igual manera, han servido para validar estos modelos.

1.2.1 Modelado matemático

Se basa en la representación aproximada de un proceso a través de ecuaciones basadas en leyes fundamentales que son las ecuaciones gobernantes del proceso. La resolución de las ecuaciones planteadas se realiza de manera numérica por medio del empleo de software especializado. Algunos de los métodos de solución empleados para el caso de ollas agitadas con gas son los siguientes:

- Modelo de la fase única: Realiza la resolución de los fenómenos hidrodinámicos de la zona bifásica tomando en cuenta la existencia de una sola fase a partir de la densidad y la fracción volumen tanto del gas como del líquido.

- Modelo Euleriano (E-E): Se resuelven las ecuaciones de momentum, continuidad, energía turbulenta y disipación para cada fase presente. Toma en cuenta el efecto global de las fuerzas de arrastre, elevación y de disipación turbulenta en el patrón de flujo.
- Modelo Volume Of Fluid (VOF): Es un tipo de modelo Euleriano aplicado a la simulación de la interacción de dos o más líquidos inmiscibles por medio de emplear una ponderación de la fracción volumen de las fases presentes, además de resolver las ecuaciones gobernantes mencionadas para el modelo E-E.
- Modelo Lagrangiano (L-E): Aplicado a sistemas multifásicos donde el fluido es tratado como una fase continua que es resuelta empleando las ecuaciones de Navier-Stokes mientras que la fase dispersa es resuelta por medio de la trayectoria de un gran número de burbujas a través del campo de flujo calculado que intercambia momentum con la fase continua.

1.2.2 Mediciones experimentales

Estas pueden ser llevadas a cabo en una planta a escala real o en planta piloto. Lo que se destaca de estos resultados es que estos son obtenidos a partir de emplear los mismos materiales del proceso real, lo que implica una mayor aproximación a lo que realmente sucede en el Horno Olla y que se pueden emplear para validar los resultados conseguidos ya sea por modelado matemático o modelado físico.

1.2.3 Modelado físico

El modelado físico es una representación aproximada de la Olla, regularmente a escala reducida del proceso real empleando otros materiales más baratos y sencillos de manipular. En este tipo de modelado se toma en cuenta los criterios de similitud para generar condiciones que puedan realmente reproducir los fenómenos que se presentan en el proceso real.

- Similitud geométrica: Guarda la proporcionalidad en todas las dimensiones de la Olla industrial con el modelo empleado.

$$\lambda = \frac{L_m}{L_{f.s}}$$

Donde:

λ = *Factor de escalamiento*

L_m = *Longitud de modelo (m)*

$L_{f.s}$ = *Longitud del modelo a escala completa (full scale)(m)*

- Similitud cinemática: Este parámetro es útil para representar una similitud en el movimiento de los flujos. En este caso de estudio, esto es posible mediante la prácticamente igualdad de la viscosidad cinemática entre el acero a 1600°C y el agua (fluido más comúnmente empleado) a temperatura ambiente.
- Similitud dinámica: Implica la semejanza entre las fuerzas que inducen el movimiento del fluido. En el caso del Horno Olla, las fuerzas principales de acción son las gravitacionales (boyantes) y de inercia. El número que relaciona estas fuerzas tomando en cuenta una diferencia de densidades es el Número de Froude modificado (Fr')

$$Fr' = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas boyantes}}$$

$$Fr' = \frac{U^2 \rho_g}{(\rho_l - \rho_g)gL}$$

Donde:

$U = \text{Velocidad del fluido } \left(\frac{m}{s}\right)$

$g = \text{Gravedad } \left(\frac{m}{s^2}\right)$

$\rho_g = \text{Densidad del gas } \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$L = \text{Longitud característica (m)}$

$\rho_l = \text{Densidad del líquido } \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

- Similitud térmica: Existen pocos estudios acerca del tema. De acuerdo con Pan y Bjorkman [8], en sistemas no isotérmicos además de satisfacer el Fr' , también se debe satisfacer la siguiente relación:

$$\beta \Delta T_m = \beta \Delta T_{f.s.}$$

Donde:

$$\beta = \text{Coeficiente de expansión térmica } \left(\frac{1}{K}\right)$$

$\Delta T_m = \text{Diferencia de temperatura en el modelo (K)}$

$\Delta T_{f.s.} = \text{Diferencia de temperatura en la olla a escala completa (K)}$

Aunque este criterio de similitud solo aplica a sistemas movidos por convección natural, el cual no es el caso de una Olla de acero agitada con gas, la cual se mueve por la fricción del gas que asciende por fuerzas boyantes al ser inyectado por el fondo y que arrastra al acero líquido provocando la agitación.

También se ha establecido que la relación del flux de calor a ambas escalas debe variar de acuerdo con [8]:

$$\frac{q_m}{q_{f.s.}} = 0.283\lambda^{0.5}$$

Donde:

$$q_m = \text{Flux superficial de calor del modelo} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{f.s} = \text{Flux superficial de calor del modelo a escala completa} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$\lambda = \text{Factor de escalamiento (adimensional)}$

Sin embargo, esto es complicado de lograr experimentalmente debido a las diferencias en las características termo-físicas entre el material del modelo físico (generalmente acrílico) y el refractario.

1.2.4 Horno Olla

Los temas principales que se abarcan en el estudio de la inyección de gas para la agitación en el Horno Olla se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Dinámica de fluidos
- Mezclado químico y térmico

Dinámica de fluidos

Al realizar la inyección del gas inerte en el fondo del baño por medio de tobera o tapón poroso, se ha establecido la formación de una pluma bifásica (gas-líquido), la cual se puede dividir en las zonas que se pueden observar en la *Figura 3*.

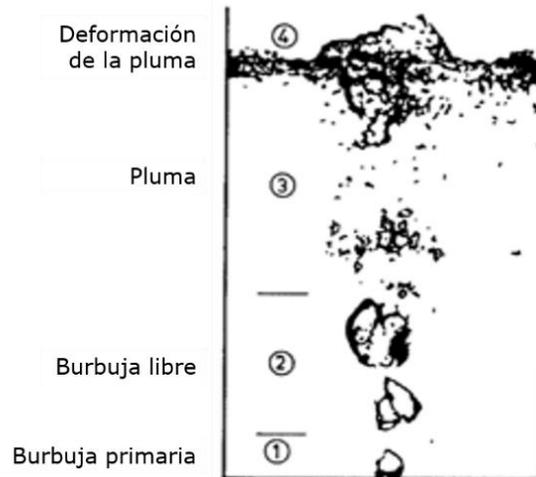


Figura 3. Zonas de la pluma bifásica. [9]

Clasificación de zonas de la pluma:

- *Burbuja primaria:* Esta es la primera zona de formación en la pluma. Los parámetros más importantes para estudiar su comportamiento son la energía cinética proporcionada por el gas inyectado y el método de inyección (toberas, tapones porosos, etc.)
- *Burbuja libre:* En este punto las burbujas son esféricas y se formaron completamente, sin embargo, su volumen respecto al total de la pluma es despreciable.
- *Pluma:* Es la zona que ocupa la mayor parte de la pluma. Las burbujas al alejarse del punto de inyección cambian su morfología a la de una capucha al realizarse su rompimiento; por lo tanto, se genera un rango dinámico de tamaños de estas, además, experimentan el fenómeno de coalescencia y desintegración continua [10]. El tamaño de la burbuja, su distribución y la velocidad de ascenso son parámetros que no dependen de los parámetros de entrada (dispositivo de inyección). A raíz de todo lo anterior, se llegó a la conclusión de que es posible caracterizar completamente la pluma (la distribución espacial del gas y líquido además de la geometría de esta) en términos de dos parámetros:

fracción volumen de gas máxima en la línea central de la pluma (α_{\max}) y el radio donde la fracción volumen de gas es la mitad del presente en la línea central ($r_{\alpha_{\max}/2}$). Brimacombe [9] desarrolló correlaciones empíricas para estas variables.

- *Deformación de la superficie*: Ocupa alrededor del 3% de la longitud de la zona bifásica. Se encuentra en contacto con la superficie. Es ahí donde el gas se libera.

Al entrar en contacto el gas con el líquido, la diferencia de densidades propicia el ascenso de burbujas de gas hacia la superficie a determinada velocidad; a este movimiento se le asocia un coeficiente de arrastre entre la burbuja y el líquido, el cual junto con la densidad del líquido es directamente proporcional a la fuerza de arrastre ejercida por cada burbuja. Se ha intentado determinar la fuerza total ejercida por todas las burbujas y, a su vez, como el producto de esta con la velocidad promedio del flujo de recirculación indicaba la energía de agitación proporcionada por las burbujas al fluido. Sin embargo, no toda la energía ligada al arrastre de las burbujas se transfiere al seno del fluido debido a las pérdidas generadas por la formación de ondas en la superficie, fenómenos de turbulencia y al deslizamiento entre la burbuja y el líquido.

Mezclado químico y térmico

El mezclado está directamente relacionado con la eficiencia del proceso de operación, el cual representa un estado de agitación de la olla. El tiempo de mezclado (τ_m) es el parámetro que se mide experimentalmente y es definido como el lapso que se requiere para que se homogenice ya sea la concentración o la temperatura en el baño líquido. Este criterio de homogenización puede ser 99%, 99.99% o el más empleado 95%.

De acuerdo a la recopilación realizada por Mazumdar [9], se han aplicado diferentes técnicas para determinar el tiempo de mezclado químico. Normalmente estas técnicas consisten en la adición de un trazador que

genera una respuesta en el baño, la cual puede ser medida por un equipo que monitorea el parámetro de estudio. Algunas de estas son:

- pHmetría: Mide la homogenización del pH empleando NaOH, HCl, o H₂SO₄ como trazadores.
- Conductimetría: Determina la homogenización de sales (KCl, NaCl por ejemplo) en el fluido a través de medir la conductividad.
- Colorimetría: Se monitorea la intensidad del color.
- Aplicación de trazador radiactivo en baños metálicos fundidos.

Al realizar la inyección de gas y la correspondiente medición, se ha encontrado que dentro de la olla se generan diferentes zonas que presentan un comportamiento distinto. Como se puede observar en la *Figura 4*, en la zona 1 el tiempo de mezclado se mantiene más elevado que en los otros dos casos, además de prácticamente no disminuir a pesar de aumentar el flujo de gas. En las zonas 2 y 3 es más notoria la reducción del tiempo de mezclado al aumentar el flujo e incluso hay mayor disminución conforme la posición de monitoreo se encuentra cerca de la superficie (se debe tomar en cuenta que esta investigación no toma en cuenta el efecto de la escoria), por lo que tanto la posición del dispositivo de monitoreo como la zona de inyección del trazador influyen en el tiempo de mezclado registrado.

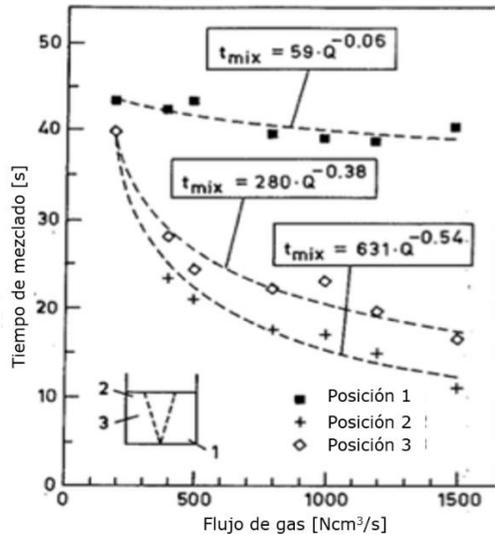


Figura 4. Efecto de la posición del dispositivo de monitoreo en los tiempos de mezclado experimental para una inyección con tapón en el centro. [9]

Se ha propuesto que, en el caso de emplearse un tapón, la inyección del trazador debe ser sobre la posición central de este; si se usan 2 tapones la inyección de trazador óptima es en el centro de la olla. Aunado a lo anterior, mayores flujos de gas en modelos más pequeños permiten que el mezclado sea más uniforme en la mayoría de las partes de la olla y así obtener un τ_m característico, sobre todo si el equipo de monitoreo se encuentra cercano a la base.

Mazumdar y Evans en su recopilación [11] establecen que por medio de resultados experimentales se han obtenido correlaciones para obtener el tiempo de mezclado, teniendo en general la siguiente forma:

$$\tau_m \propto B * \varepsilon_m^{-p} * R^m * L^{-n}$$

$$\tau_m \propto A * Q^{-x} * R^y * L^{-z}$$

Donde

$A, B = \text{Constantes}$

$R = \text{Radio del modelo}$

$\varepsilon_m = \text{Energía de agitación}$

$L = \text{Longitud del modelo}$

$Q = \text{Flujo de gas}$

La expresión puede depender tanto de Q como de ε_m , pues se ha demostrado que la energía de agitación se puede obtener a partir del flujo de gas. Existen otras relaciones, sin embargo, en donde se ha demostrado que el tiempo de mezclado depende de la energía de agitación/flujo, geometría de la olla y configuración del tapón. Los valores que toman tanto los exponentes como las constantes son dependiendo de las consideraciones hechas al realizar la experimentación; esto incluye el rango de flujos empleado, criterio de mezclado, ubicación del tapón o el hecho de tomar en cuenta el aporte al movimiento de recirculación de la energía cinética del gas de entrada (suele ser menor al 5%).

Iguchi [12], además, determinó que el efecto de la viscosidad cinemática es de gran importancia, por lo que la incluyó como un factor multiplicativo a la expresión que involucra el flujo Q . Dicha expresión funciona en un amplio rango de flujos y dimensiones de olla.

La configuración del medio de inyección es otro parámetro importante, si se trata de un solo tapón para inyección, la posición óptima es a la mitad del radio; en el caso de ser 2 tapones, se recomienda que el ángulo entre estos sea de 180° e igualmente se posicionen en el centro del radio.

Se debe tomar en cuenta que la mayoría de los estudios mencionados, fueron realizados sin considerar una capa que simulara la escoria, sin embargo, se estableció que la presencia de esta disipa la energía de agitación para de esta forma incrementar el τ_m .

Putan y colaboradores [13] estudiaron el fenómeno de estratificación térmica durante el mantenimiento "holding" de olla previo a la colada, debida a convección natural, a través de modelado físico y matemático. Se empleó un modelo físico de una Olla de 105 ton a escala 1/5; este fue equipado con cámaras de enfriamiento para regular el flux de calor en las paredes y 18 sensores de temperatura ubicados dispersados en la mitad

del plano vertical central. Para el modelo matemático plantearon las ecuaciones de continuidad, momentum y energía en sistema cartesiano. Partiendo de una temperatura inicial promedio de 45°C e introduciendo un flujo refrigerante a 12°C para generar la estratificación, obteniendo resultados por 6 minutos habiendo una alta concordancia entre las temperaturas calculadas y las experimentales, disminuyendo a mayor velocidad las temperaturas en las regiones más cercanas a la superficie. Los resultados permiten verificar la validez de los números adimensionales Fr y $\beta\Delta T$ como criterios de similitud para modelar el fenómeno de convección natural con agua.

Maldonado y colaboradores [14] investigaron por medio de un modelo matemático la influencia del flujo de gas, el número de tapones porosos y su posición en el fenómeno de mezclado tanto químico como térmico. En el estudio consideraron la fuente localizada de calor que son los arcos generados en los tres electrodos de grafito en una Olla industrial. Se realizaron las consideraciones de dos fases (Gas-Líquido), el tamaño de burbuja es constante que desprecia el fenómeno de coalescencia y rotura de burbuja y el empleo de un modelo cilíndrico de 200 ton de capacidad. Se encontró que el flujo de gas influye mínimamente en el mezclado térmico. También se puede concluir que la inyección de gas con un solo tapón se ve favorecida al realizar de manera céntrica, contrario a lo que sucede con dos tapones donde las plumas generadas se comportan como una barrera para el mezclado térmico.

Farrera-Buenrostro y colaboradores [15] llevaron a cabo una simulación numérica multifásica de la pérdida de temperatura del acero líquido durante la etapa de desulfuración en un modelo escala 1:17 de una Olla de 140 toneladas de capacidad. Entre las consideraciones se encuentra un flujo turbulento en estado transitorio, condición de no-deslizamiento en todas las superficies y el líquido es una fase continua y el gas una fase

dispersa en el líquido. El espesor de la escoria es el factor que promueve una mayor pérdida de calor del acero, seguido de la viscosidad y el tipo de refractario usado.

Dada la prácticamente nula información sobre mezclado térmico, el desarrollo de este se fundamenta en las bases del ampliamente estudiado y desarrollado mezclado químico. Aún más complicado es encontrar investigación experimental industrial del ámbito térmico de la olla en la literatura. En 1999 Grip [16] experimentó industrialmente con el Horno Olla realizando mediciones de la temperatura durante el 'holding' y al momento de vaciar al "Tundish". Se montaron termopares recubiertos de material cerámico en las paredes para una olla de 7 toneladas y un rodillo cerámico con termopares inmerso verticalmente en la olla de 107 toneladas. Las mediciones obtenidas fueron útiles para validar los contornos de temperatura para estratificación térmica de la *Figura 5* obtenidos mediante modelado matemático.

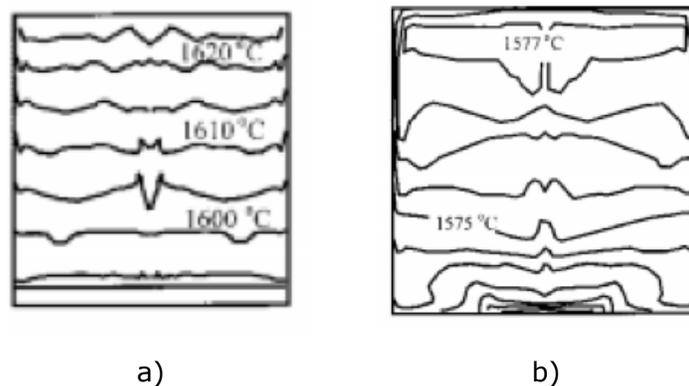


Figura 5. Estratificación térmica de horno olla presentada por Grip a) Olla de 7 ton. b) Olla de 107 ton. [16]

Es entonces claro que a la fecha no hay estudios profundos y sistemáticos de modelado físico que aborden la problemática del mezclado térmico que es una de las funciones de la Olla de aceración

1.2.5 PLIF térmico

La Luminiscencia Inducida con Láser Plano (PLIF) es una técnica óptica de medición instantánea de magnitudes escalares en un plano determinado, tal como concentración y temperatura, basada en la propiedad de fluorescencia de ciertos reactivos, además de ser no intrusiva y por lo tanto evitar la distorsión de flujos [17].

Para realizar el estudio de la distribución de temperatura en el fluido con esta técnica, se necesitan los siguientes elementos básicos: Fluido objeto de estudio, compuesto trazador, láser de luz, filtro óptico y cámara de detección [Figura 6].

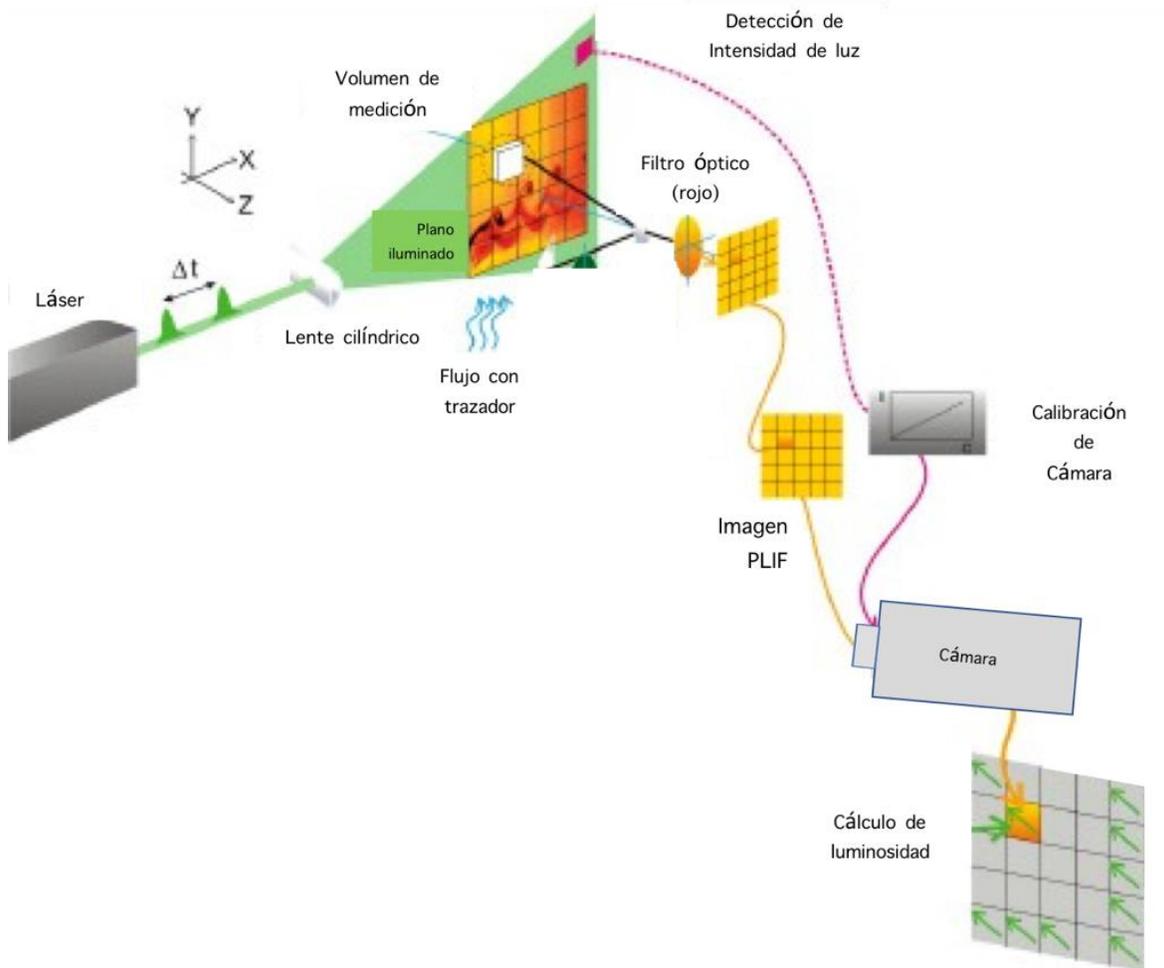


Figura 6. Estructura del sistema del PLIF. [18]

La técnica en términos generales consiste en hacer incidir un haz constante de luz láser de determinada longitud de onda, sobre un plano del fluido; el cual contiene una concentración definida de trazador; este absorbe parte de la energía de la luz láser recibida para así ser llevado a un estado de energía electrónica mayor y finalmente reemitir espontáneamente el excedente de energía en forma de luz, con mayor longitud de onda, al regresar a un estado de energía más bajo (fenómeno de fluorescencia) [19]. El filtro óptico colocado en el lente de la cámara sólo permite el paso de la luz fluorescente emitida, de forma que la cámara bloquee el paso de la luz proveniente del láser y capta solamente la proveniente del trazador.

Específicamente en la técnica de PLIF térmico, la intensidad de fluorescencia del trazador depende de la temperatura, a una concentración constante del trazador.

La elección del trazador es primordial para la realización de la experimentación, dado que es la fuente de la información recabada. Para esto, requiere cumplir con ciertas características [20]:

- Ser soluble en el fluido de estudio.
- Tener alta eficiencia cuántica, la cual es un indicio de la intensidad de luz reemitida; si esta aumenta, la precisión de las mediciones mejora.
- Que el número de Schmidt (Sc) entre el trazador y el solvente sea alto, para inhibir la difusión del reactivo en el fluido.
- Ser estable químicamente al estar bajo las condiciones del láser con el que se cuenta. Si la energía suministrada por el láser es muy alta o la estabilidad fotoquímica del trazador muy baja, es factible la degradación del trazador.
- No sufrir degradación bajo las temperaturas de trabajo.

- El espectro de absorción y emisión del compuesto debe estar lo suficientemente separado para evitar la reabsorción de la luz emitida.
- En el caso de PLIF Térmico, el trazador debe tener buena sensibilidad de fluorescencia frente a la temperatura.

Un reactivo ampliamente usado para PLIF térmico y que cumple las características anteriores, es la Rodamina B. Es un compuesto con alta solubilidad en agua y alcohol que no se ve afectado en gran manera por los efectos de la destrucción fotoquímica sino hasta niveles de energía extremadamente altos, los cuales no suelen ser necesarios debido a la alta eficiencia cuántica que posee. En la *Tabla 2* se presentan sus propiedades.

Tabla 2. Propiedades de la Rodamina B [21] [22].

Fórmula química	C ₂₈ H ₃₁ N ₂ O ₃ Cl
Peso molecular	479.01 g/mol
Solubilidad (agua)	0.8 g/100mL
Absorción λ_{\max} (agua)	554 nm
Fluorescencia λ_{\max} (agua)	576 nm
Número de Schmidt S_{agua}	800

Cabe destacar que la absorción de luz es mínima a muy bajas concentraciones de Rodamina B, lo que conduce a que haya una relación lineal entre la intensidad de luminosidad y la temperatura.

1.3 Hipótesis

La técnica PLIF térmico arrojará mapas de temperatura en un plano de un modelo físico de una olla agitada con gas en presencia de gradientes térmicos inducidos y se podrá captar la evolución térmica del sistema hasta lograr el equilibrio o mezclado térmico.

1.4 Objetivo general

- Implementar la técnica PLIF térmico por vez primera en un modelo físico de agua de una olla agitada con gas.

1.4.1 Objetivos particulares

- Lograr una adecuada calibración de la técnica PLIF térmica en un rango de temperaturas entre 20 y 60° C de baños isotérmicos para ver el cambio en nivel fluorescencia que se traduzca en una curva de calibración adecuada.
- Validar la técnica a través de medir las evoluciones térmicas del mismo experimento, pero en una olla instrumentada con termopares tipo K.
- Medir la evolución térmica de una olla agitada con gas en presencia de un gradiente de temperatura y capturar con la técnica calibrada, la evolución de los mapas térmicos en el tiempo hasta lograr el mezclado térmico.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Modelado físico

Para la correcta extrapolación de los resultados entre la olla de aceración y los modelos a escala, se emplearon los criterios de similitud previamente detallados.

- *Similitud geométrica*

Se contó con la disponibilidad de dos modelos de diferente escala [Tabla 3] que cumplieran con la proporción de dimensiones respecto a una olla de escala completa de 200 toneladas.

Tabla 3. Dimensiones del reactor y los modelos físicos a escala.

Sistema	Altura del modelo H [m]	Altura del baño H _b [m]	Diámetro del modelo [m]	Factor de escalamiento λ
Olla de aceración	3.736	2.960	3.226	-
Modelo escala 1/6	0.6034	0.4780	0.520	0.1615
Modelo escala 1/17	0.2143	0.1698	0.185	0.0537

- *Similitud dinámica*

Este criterio fue evaluado mediante la semejanza entre el número de Froude modificado (Fr') de la olla y el de los modelos.

$$Fr'_{olla} = Fr'_{\frac{1}{6}} = Fr'_{\frac{1}{17}}$$

Esta semejanza entre números se lleva a cabo al realizar el escalamiento del flujo de gas aplicado, esto por medio de considerar la siguiente expresión reportada en la literatura [13]:

$$Q_{modelo} = \lambda^{2.5} Q_{f.s.}$$

Donde:

$$Q_{\text{modelo}} = \text{Flujo de gas aplicado al modelo físico}$$

$$Q_{f.s.} = \text{Flujo de gas aplicado a la Olla de aceración}$$

- *Similitud cinemática*

Como se mencionó anteriormente, la viscosidad cinemática (ν) es una variable útil para equiparar el movimiento del flujo tanto del agua a 20°C como del acero líquido a 1600°C. [23] [24]

$$\nu_{\text{acero } 1600^{\circ}\text{C}} \approx \nu_{\text{agua } 20^{\circ}\text{C}}$$

$$\nu_{\text{acero } 1600^{\circ}\text{C}} = 0.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu_{\text{agua } 20^{\circ}\text{C}} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

- *Similitud térmica*

La similitud térmica en esta experimentación consistió en tener una rampa de incremento de temperatura con el tiempo parecida a la del proceso real, con el valor de esta rampa térmica siendo aproximado a 1 °C/min [25].

2.2 Procedimiento de PLIF Térmico aplicado

Las características de los equipos e instrumentos empleados y su implementación en el sistema PLIF se especifican a continuación:

1. Equipo digital Canon®, modelo EOS Rebel™ con una resolución de 1920x1280 pixeles. Configurada para capturar video en escala de grises; la cual tiene acoplado un filtro óptico de longitud de onda de 570 nm especial para la técnica [Figura 7a]. La cámara es colocada sobre un soporte anidado en el sistema de posicionamiento y sujetado por la parte inferior con un tornillo de cabeza grande [Figura 7b]. La alineación de la cámara respecto al sistema de posicionamiento se hace como en la Figura 7c; sobre el soporte

externo se colocó un trozo de cinta de aislar que sirviera de marcador para colocar el borde de la cámara; asimismo, con una regla "L" se marcaron líneas sobre la barra de posicionamiento para alinear la cámara en ambos lados. El equipo fue ubicado a una distancia a la que se pudiera distinguir todo el plano de interés (lo mismo sucede para la altura), teniendo una distancia entre el lente óptico y la pared frontal del modelo de 58 cm.

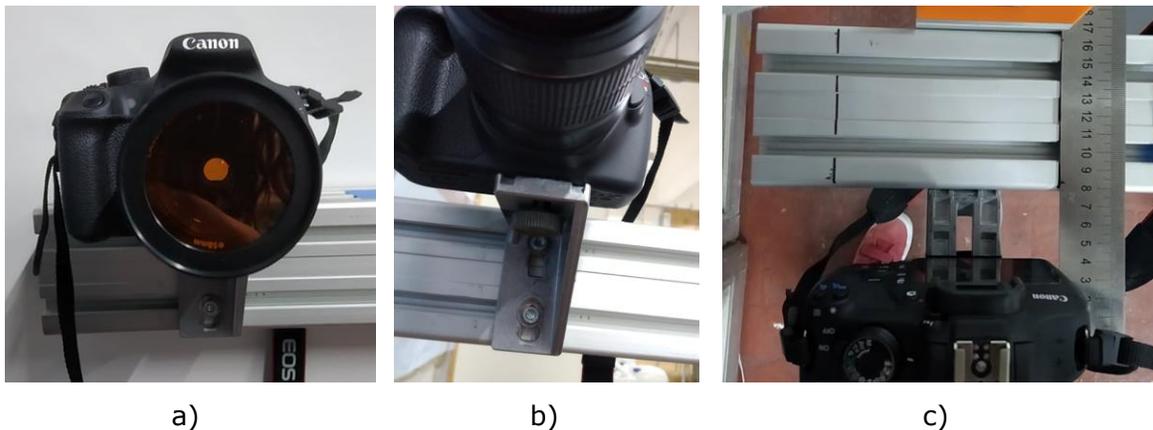


Figura 7. Arreglo de la cámara a) Lente óptico acoplado b) Tornillo de sujeción en la parte inferior c) Alineación de la cámara respecto al sistema de posicionamiento.

2. Controlador de láser. Marca ALIENPRO®, modelo DMX192CH™ [Figura 8]. Primero se debe encender el regulador y posteriormente el controlador. Al encenderlo se presiona el botón "1" del panel de Scanners y también el botón "1" para el panel de Scenes, así, el equipo ya está configurado para proyectar un punto de luz verde



Figura 8. Control de láser.

3. Modelo: Tanque de acrílico que consta de un cilindro a escala 1/17 de la olla de aceración y una chaqueta cuadrada rodeando; cuya

principal función es evitar la distorsión óptica por la curvatura del cilindro en las imágenes capturadas. Cuenta con orificios en diferentes posiciones en el fondo donde se introducen las conexiones rápidas (macho) de $\frac{1}{4}$ de pulgada requeridas según la experimentación, las cuales son ajustadas previo a ubicar el modelo en su lugar [Figura 9].



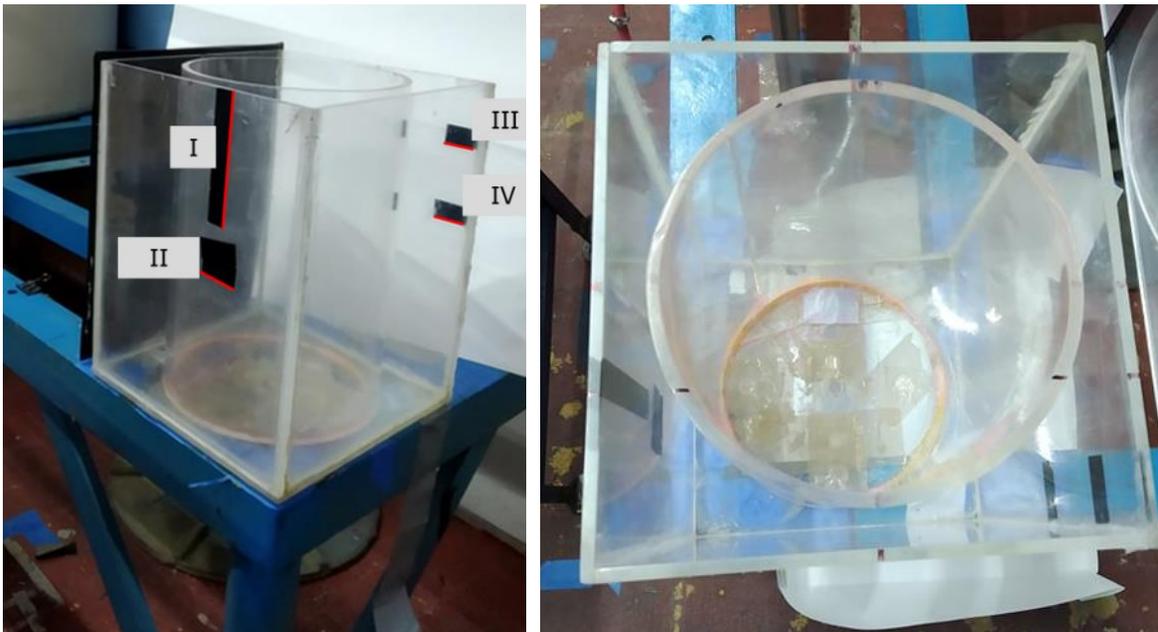
Figura 9. Conexión rápida instalada en la parte inferior del modelo.

El modelo se encuadra en la esquina más externa de una mesa larga de soporte; se procede a nivelar en el tanque en dos direcciones; adicionalmente, se le coloca una pantalla negra en la parte posterior externa del modelo (paralela al plano de luz) para omitir el máximo de interferencias luminosas durante las grabaciones. En la *Figura 10a* se observa la colocación de 4 marcas de referencia resaltadas en rojo:

- I. Este marcador sirve como guía para alinear el plano de luz incidido, tanto verticalmente como su posición, y al mismo tiempo también alineando con el paso del láser sobre las marcas en la parte superior del modelo [Figura 7b].
- II. La función de estas cintas es tapar la incidencia de luz sobre la superficie de baño, ya que, al realizar el burbujeo, el movimiento de las ondas formadas en la superficie refleja la

luz hacia el plano de medición y causan ruido en los resultados al tratarse de una técnica que lee la temperatura basada en la luminosidad de cierta área del fluido.

- III. Esta marca es útil para corroborar el nivel del agua destilada en la chaqueta en caso de que haya pequeñas fugas.
- IV. Este indicador permite monitorear que la altura en el nivel de la solución de Rodamina B se mantenga, lo cual es de vital importancia dado que esta depende de la fluidodinámica que se presenta en el modelo. En el costado donde el láser incide en el modelo, con cinta negra se cubre la parte superior del plano en el fluido hasta una profundidad donde el impacto del láser en las ondas superficiales provocadas por el burbujeo no genere destellos sobre el plano, lo cual causó mediciones erróneas y que inicialmente dificultó las mediciones.



a) b)
Figura 10. Posición del modelo. a) Marcas de referencia b) Vista superior.

Por último, con un nivel de aire o burbuja se corrobora la horizontalidad del tanque en dos direcciones [Figura 11].

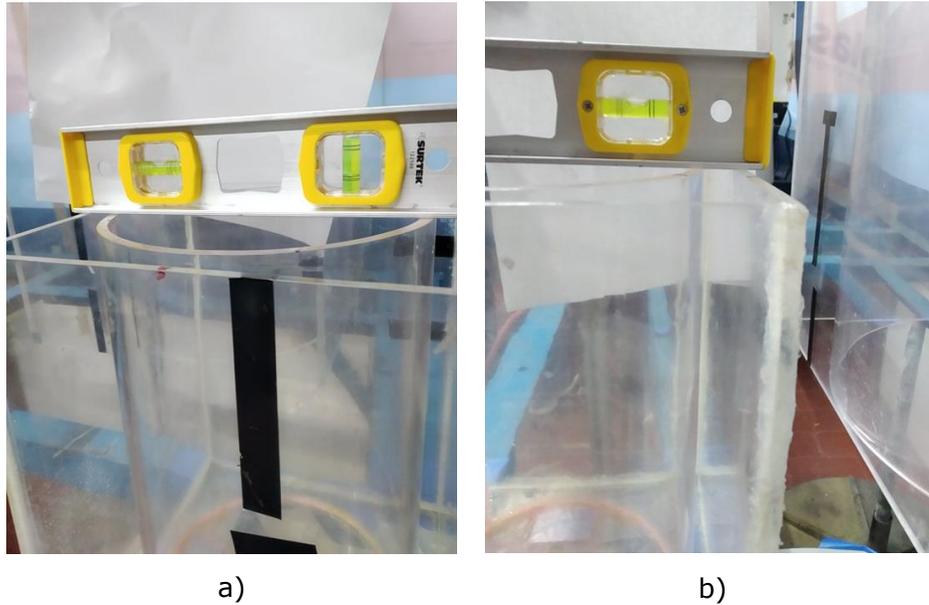


Figura 11. Nivelación del modelo. a) En una dirección b) Dirección perpendicular a la anterior.

4. Fuente láser DPSS. Marca MEGALUZ®, modelo LA014™. Equipo de luz verde que emite una longitud de onda de 532 nm con una potencia de 20W. En la salida cuenta con una estructura de madera MDF (Fibra de Densidad Media) anidada en el propio láser que sostiene una lente cilíndrica de 5x11 mm [Figura 12] que genera un plano de luz a partir del punto incido sobre ella. Esta estructura está diseñada para poder ser rotada y así otorgar verticalidad al plano del láser. Entre la salida del plano de luz y la pared lateral del modelo hay una distancia de 31.5 cm.

La fuente de luz se ubicó sobre una mesa con patas de altura ajustable; el equipo fue posicionado de forma que se acoplara una de sus esquinas con la de la mesa, haciendo así coincidir ambos bordes del láser con los de la mesa. Debido a la forma en que se emite la luz, es necesario darle cierta inclinación del láser hacia atrás. La mesa en la parte posterior al láser tiene una altura de 79

cm, mientras la parte de frente al modelo tiene una altura de 82 cm. En sentido paralelo al modelo, la mesa se desplaza con el láser prendido hasta que coincide con el filamento de la marca especificada para el modelo de acrílico [Figura 13].



Figura 12. Posición de la fuente de láser en la mesa de soporte.

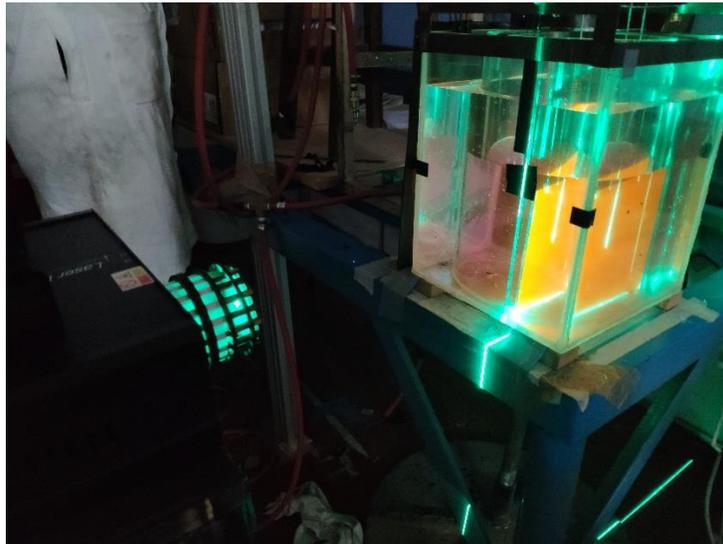


Figura 13. Incidencia del láser sobre el modelo. Alineado sobre la cinta de aislar de referencia.

5. Tapa metálica que soporta hasta 5 termopares a la altura deseada y al quemador en el centro del baño. Cuenta con dos barras de sujeción perforadas en las posiciones de los termopares que otorgan soporte a estos mismos para evitar su movimiento durante la experimentación. Este mecanismo es móvil para modificar la posición de los termopares respecto al plano de medición en caso de ser necesario [Figura 14].

En el centro cuenta con un cilindro donde se sostiene la extensión de cobre del quemador con pares de tornillos enroscados a diferentes alturas.



Figura 14. Soporte metálico de termopares y quemador.

6. Calentador de resistencia y propela. Marca OMORC®, modelo Sous Vide™ [Figura 15]. Usado durante el calentamiento para calibración. Su set up es sencillo, primero se establece el tiempo de homogenización de la temperatura, después se indica la temperatura de interés y se da inicio al proceso.



Figura 15. Instrumento de calentamiento in situ.

7. Adquisidor de datos. Marca IO Tech®, modelo Personal Daq/56™ [Figura 16].



Figura 16. Adquisidor de datos.

8. Computadora Lenovo® que tiene instalado el software DaqView® para la adquisición de datos provenientes de los termopares.
9. Compresor de aire Coleman®, modelo Powermate PREMIUM™ [Figura 17].



Figura 17. Compresor de aire.

10. Flujómetro. Cole Parmer®, modelo PMR1-010366™ [Figura 18a]. Cuenta con conexiones de entrada y salida tipo macho [Figura 18b]. Para un flujo de 1.54 LPM, la línea media de la esfera se debe posicionar sobre la marca del número 10 de la escala.



a)



b)

Figura 18. Flujómetro. a) Vista frontal b) Vista lateral.

11. 5 termopares tipo K con sus respectivas extensiones que son colocados lo más cercano posible al plano de luz (aproximadamente 0.5 cm). Creando una barrera física en las perforaciones de las

barras de la tapa metálica, a cada termopar se le enrolla un trozo de cinta de aislar en la posición que se requiera para obtener el nivel de inmersión deseado en cada caso.

12. Dispositivo de calentamiento que consiste en un cartucho de gas butano/propano conectado a una extensión de tubería flexible de cobre con terminación en una válvula con boquilla de latón [Figura 19]. El quemador se ajusta en la tapa de forma que la salida de la boquilla esté a 5 cm de la superficie y sin inclinaciones [Figura 20].



Figura 19. Dispositivo de calentamiento.

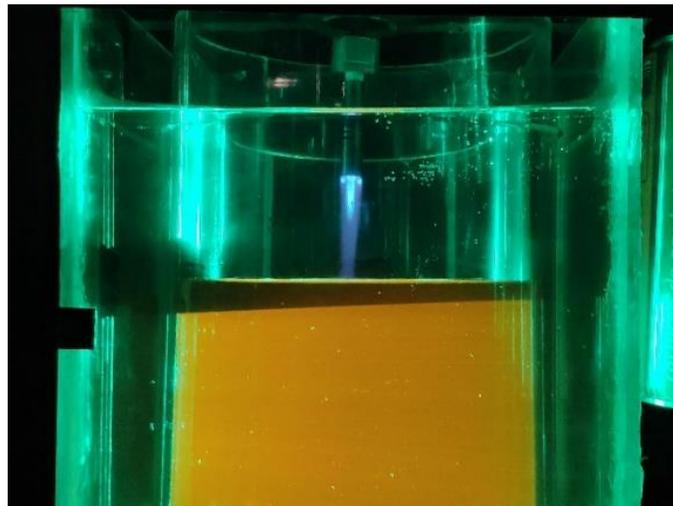


Figura 20. Quemador ajustado.

La ubicación espacial de los componentes anteriores se muestra en la *Figura 21*, donde se presenta ya montado todo el sistema.

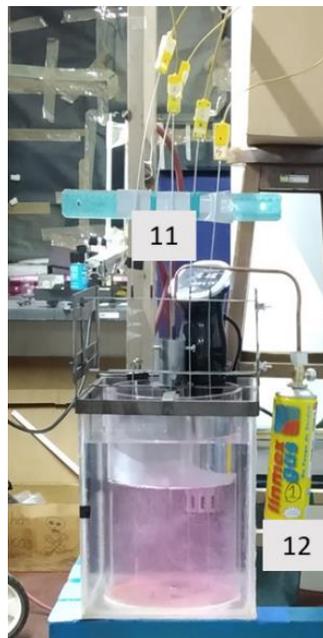


Figura 21. Sistema completo de PLIF térmico.

2.2.1 Técnica de Medición del PLIF (TM PLIF)

Este es un procedimiento general que se realiza en cada una de las pruebas de PLIF térmico, ya sea calibración de la técnica o una prueba de mezclado térmico, una vez que el modelo ya se encuentra bajo las condiciones que se requieren analizar.

- Se introduce en el modelo aire con una manguera para remover las burbujas, tanto de la chaqueta como de la solución.
- Se elimina cualquier fuente de luz que pudiera afectar las imágenes captadas.
- Se incide el láser encendiendo primero la consola de control y luego la fuente de luz.
- Se toma una grabación del modelo, la duración del video depende del tipo de prueba que se esté llevando a cabo.
- Una vez que finalizó la grabación del video, se apaga el láser y se prepara el sistema para la siguiente medición, en caso de ser necesario.

Pre-tratamiento de las imágenes

Previo a obtener la intensidad de luminosidad, todos los videos fueron procesados para obtener imágenes en escala de grises del fluido dentro del cilindro y posteriormente ser procesadas en MATLAB®.

Conversión de video a imagen

Para esta acción se hizo uso del programa Free Video to JPG Converter. Empleando este software se realizó una captura de imagen cada cierto tiempo (determinado dependiendo de si es calibración o experimento). En la *Figura 22* se muestra un ejemplo de set up y en la *Figura 23* se presenta el resultado.

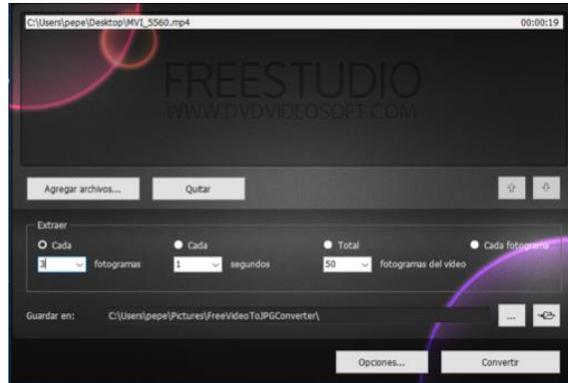


Figura 22. Set up usado en el convertidor de video.

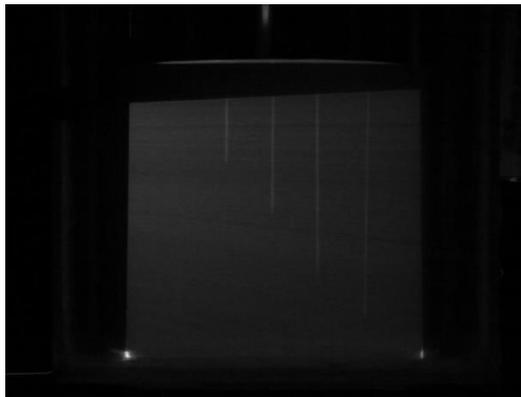
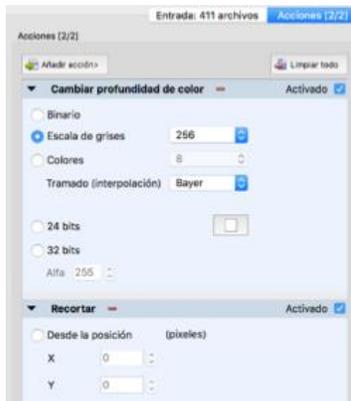


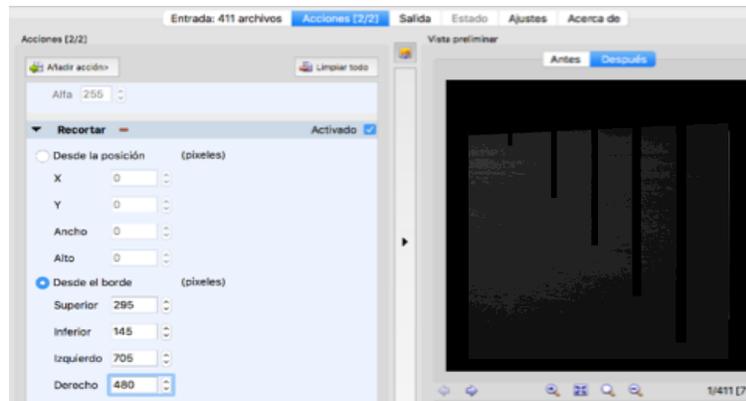
Figura 23. Imagen obtenida a partir de video.

Enmascarado de las imágenes

El software XnConvert® permite aplicar una misma acción a todas las imágenes seleccionadas. Como se observa en el set up [Figura 24], las imágenes fueron convertidas a escala de grises 256 y se recortaron para sólo dejar el área del fluido a analizar para posteriormente añadir una máscara negra (coloración 0) hecha en Photoshop CS5® cubriendo la parte superior del baño no iluminada y los termopares.



a)



b)

Figura 24. Ejemplo del set up en el software XnConvert® a) Conversión a escala de grises b) Recorte de la imagen y colocación de máscara

2.3 Determinación de variables

Parte de la implementación de la técnica PLIF consistió en establecer las condiciones experimentales de trabajo, tales como escala del modelo y concentración de Rodamina B.

2.3.1 Análisis preliminar de sensibilidad térmica

El primer parámetro evaluado fue el de la escala del modelo; esto por medio de valorar la caída de temperatura en los dos modelos disponibles y decidir en cuál de ellos se implementaría la técnica. De los resultados de esta prueba se requería tener una temperatura homogénea en el fluido interno del cilindro por un aproximado de 30 segundos, lo cual permitiera realizar la correcta construcción de la curva de calibración.

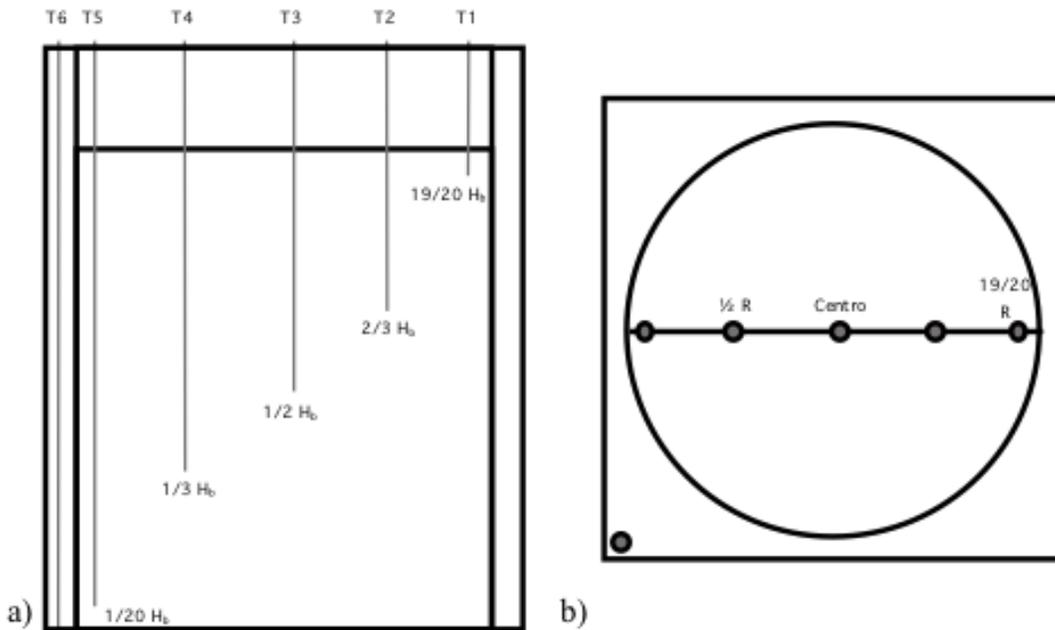
Para la experimentación se implementó un sistema como el mostrado en la *Figura 25*, en el que se observa el montaje donde se utilizaron 6 termopares tipo K distribuidos diagonalmente para realizar un barrido tanto horizontal como vertical de la temperatura en el modelo, asimismo, se colocó un termopar en la chaqueta para evaluar el comportamiento térmico de ésta [*Figura 26*]. Tanto el cilindro como la chaqueta fueron llenados con agua a aproximadamente 70°C hasta la altura del baño correspondiente a cada modelo [*Tabla 3*] para dejar enfriar el sistema estáticamente a temperatura ambiente por 80 minutos; realizando al mismo tiempo la adquisición de temperaturas con el programa DaqView®.



a)

b)

Figura 25. Sistemas montados para análisis de sensibilidad térmica a) Modelo a escala 1/17 b) Modelo a escala 1/6.



a)

b)

Figura 26. Posicionamiento de los termopares en el sistema. a) Vista lateral b) Vista superior.

Se presentan las curvas de enfriamiento obtenidas en ambos modelos [Figuras 27 y 28] durante el primer minuto de enfriamiento. La importancia de realizar el análisis de un lapso de tiempo inicial tan corto radica en la necesidad de que el modelo a usar tenga una buena estabilidad térmica, sobre todo para la elaboración de las curvas de calibración donde el tiempo de medición es de segundos y se requiere

temperatura homogénea. Comparando los resultados de ambos modelos se vislumbra una buena homogeneidad de temperatura en los mismos 4 termopares (aquellos sumergidos a una mayor profundidad) de los dos modelos durante los primeros 30 segundos con una oscilación de 0.2°C en la temperatura; pasado este tiempo, la temperatura tiende disminuir un poco más en el reactor grande (hasta 0.3°C). El termopar que en estas curvas de enfriamiento muestra un comportamiento más alejado del resto, es el que se encuentra más cercano a la superficie y a pesar de esto la diferencia es de 1°C o menor, sobre todo en el caso del reactor más pequeño. Si también se consideran los resultados del enfriamiento a largo tiempo [Figuras 29 y 30], naturalmente el reactor más grande se enfría más lento, sin embargo, la diferencia de pérdida de temperatura es de alrededor 5°C , un valor no tan distante comparando la diferencia de tamaño. Cabe mencionar que el termopar ubicado en la chaqueta en ambos casos es el que presenta mayor caída de temperatura, no obstante, en los dos modelos se guarda la proporción de diferencia de temperatura con el resto de los termopares.

Conforme a lo anterior, el modelo seleccionado para trabajar fue el de escala 1/17. Las razones principales son:

- No presentó gran diferencia de caída térmica respecto al modelo 1/6 en los primeros momentos de enfriamiento, a pesar de que el gradiente de temperatura inicial (choque térmico) fue bastante cercano al mayor que se trabajará (70°C).
- La diferencia de enfriamiento, entre ambos modelos, a largo tiempo no es considerablemente significativa.
- Posee mayor facilidad de manipulación incluyendo traslado, tiempo de calentamiento y facilidad de homogenización.

- Se ocupa menor cantidad de material; ya que mientras en el modelo 1/6 se requieren 80L de agua sólo para alcanzar la altura Hb, en este se requieren alrededor de 4.5L

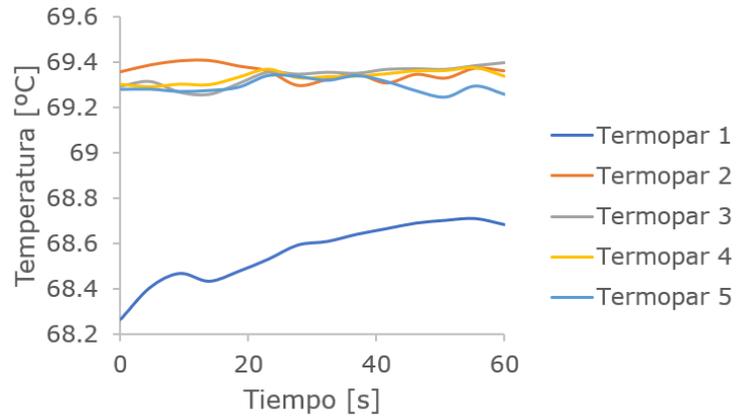


Figura 27. Curva de enfriamiento los primeros 60 segundos del modelo a escala 1/17.

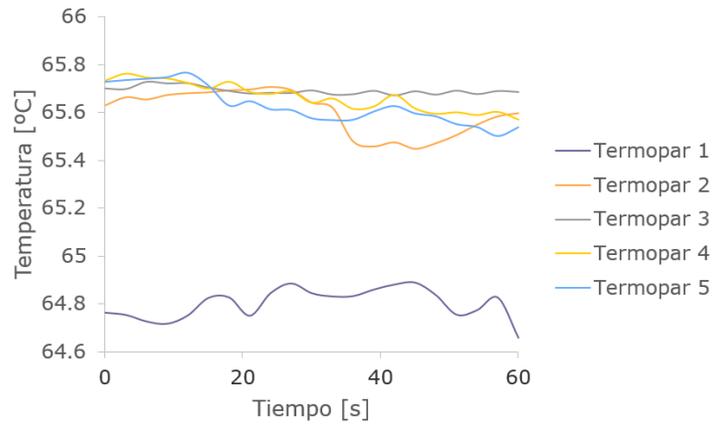


Figura 28. Curva de enfriamiento los primeros 60 segundos del modelo a escala 1/6.

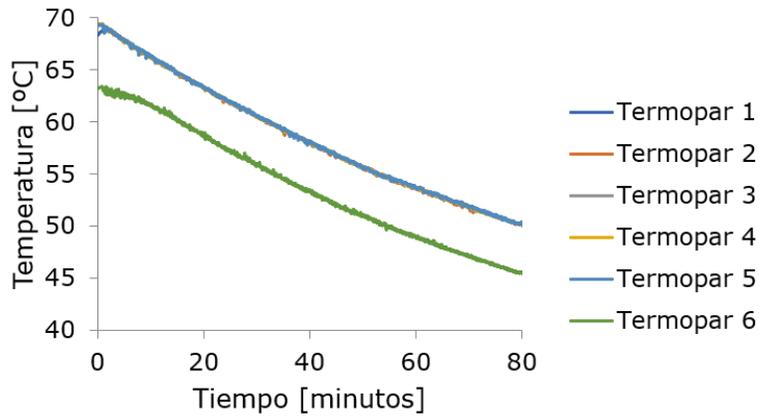


Figura 29. Curva de enfriamiento total de los 6 termopares en el modelo a escala 1/17.

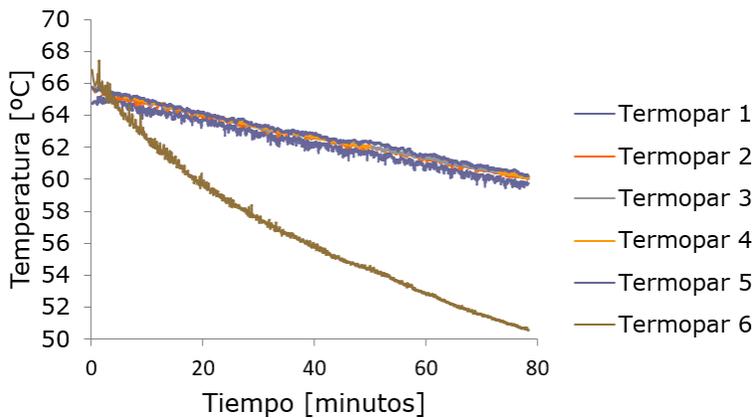


Figura 30. Curva de enfriamiento total de los 6 termopares en el modelo a escala 1/6.

2.3.2 Análisis preliminar de concentración de Rodamina B

Para analizar este parámetro se llevó a cabo una serie de pruebas experimentales y así obtener la concentración óptima de Rodamina B.

En la *Tabla 4* se presentan las condiciones experimentales para las pruebas realizadas.

Tabla 4. Matriz de experimentos realizada para la determinación de la concentración de Rodamina B.

Concentración [$\mu\text{g/L}$]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
50	Temperatura ambiente (22)
	30
	40
	50
	60
	70
100	Temperatura ambiente (22)
	30
	40
	50
	60
	70
200	Temperatura ambiente (23)
	30
	40
	50
	60
	70

Se dispuso el montaje de un sistema como el mostrado en la *Figura 21* con la cámara enfocada; para esto se utilizó el modelo escala 1/17; este fue colocado de manera que el láser incidiera sobre el plano posicionado en R/2 [*Figura 31*]. El inicio del ensayo consistió en llenar el cilindro del modelo con una solución acuosa de Rodamina B, con una concentración de 50 $\mu\text{g/L}$ a temperatura ambiente, hasta la altura del baño referida en la *Tabla 3* (16.98 cm); para el llenado de la chaqueta se utilizó agua destilada a temperatura ambiente. Una vez completada la instalación, se aplicó la técnica de medición (TM PLIF) previamente detallada. Se decidió que todas las mediciones de la experimentación fueran hechas sobre el plano referido en la *Figura 31*; así, el punto de inyección de aire (por ende, las burbujas) no causa ninguna interferencia en el plano de

medición que genere sombras. La duración de los videos capturados en esta experimentación es de 5 segundos aproximadamente. Este procedimiento se realizó para cada una de las temperaturas restantes y para las demás concentraciones, después se procedió a usar un código adaptado del PLIF químico en una tesis previa [26] para obtener una referencia del nivel de luminosidad promedio en el baño, el cual es explicado más adelante.

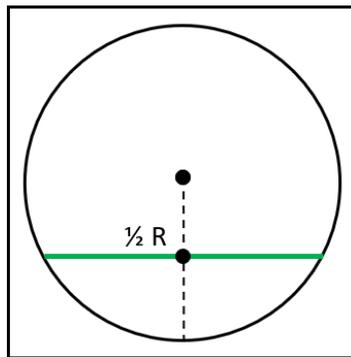
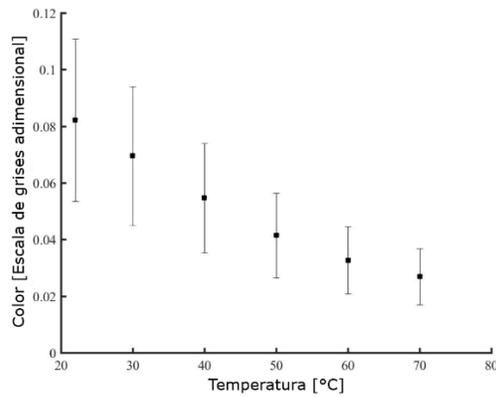


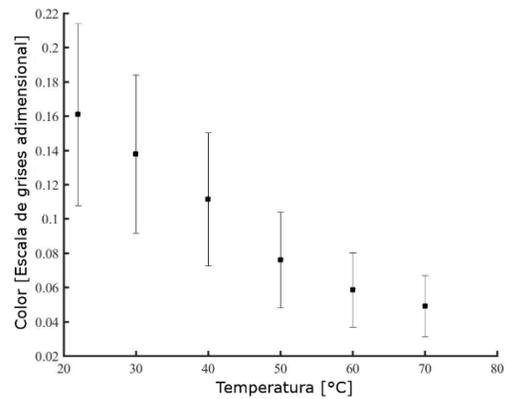
Figura 31. Plano de incidencia del láser.

Para la elección del parámetro de concentración de Rodamina B se requirió evaluar el nivel de intensidad luminosa alcanzado y el cambio de este en función de la temperatura, ya que una concentración muy elevada podría causar una saturación de intensidad luminosa en la imagen y una concentración demasiado baja llevaría a una deficiencia en la detección de luminosidad.

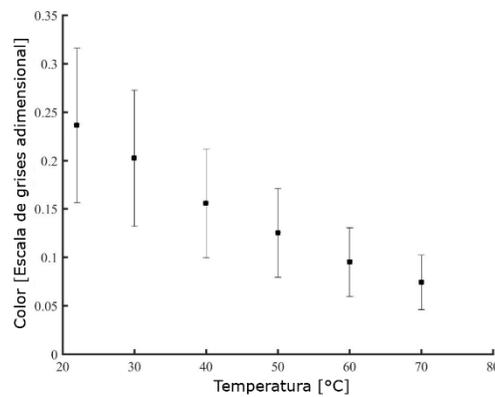
Los resultados obtenidos para las 3 concentraciones probadas [Figura 32], marcan que efectivamente una mayor concentración involucra un aumento en la luminosidad, sin la presencia de flagrantes fluctuaciones que impidan analizar el comportamiento de la curva y obtener temperaturas a partir de ella.



a)



b)



c)

Figura 32. Curvas de calibración total para diferentes concentraciones de Rodamina B a) 50 µg/L b) 100 µg/L c) 200 µg/L.

Si con la variación de la temperatura el valor de intensidad luminosa no cambia significativamente, se corre el riesgo de realizar un error de interpretación durante el procesamiento de datos a pesar del empleo de software. La evaluación de esto último se hace mediante el valor absoluto de la pendiente de las curvas de la *Figura 33*; cuanto mayor sea la pendiente, el rango de luminosidad para un mismo intervalo de temperatura será mayor y la técnica detectará mejor los cambios de temperatura al ser más sensible la correlación entre luminosidad y temperatura. En la *Figura 33* se aprecia claramente que a 200 µg/L de Rodamina B se presentó la mayor pendiente, que finalmente es la concentración que se utilizó en todas las mediciones de PLIF.

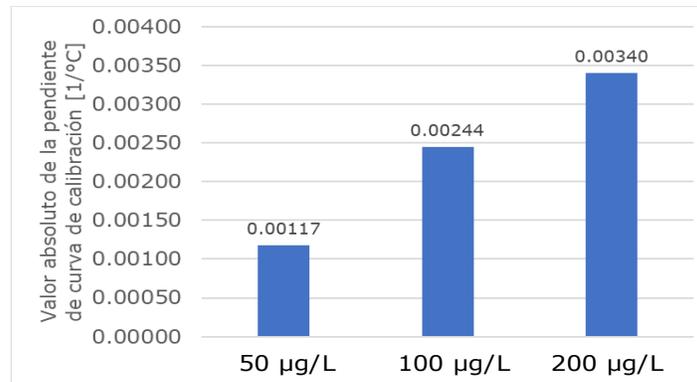


Figura 33. Comparativo del valor absoluto de las pendientes de las curvas de calibración totales para 3 diferentes concentraciones.

2.4 Calibración

La realización de la curva de calibración se basó en obtener y registrar la luminosidad del baño a diferentes temperaturas del agua en la olla. Se realizó la curva de calibración en el plano previamente referido en la *Figura 31*. Es necesario que todas las mediciones de PLIF sobre un mismo plano sean realizadas en la misma sesión, es decir, la calibración y pruebas de medición juntas; esto para evitar distorsiones en la intensidad luminosa captada debido a cambios en la distancia entre el plano iluminado y la cámara o algún otro movimiento que modifique el arreglo geométrico. En caso de que haya un cambio en las distancias entre láser-modelo-lente de cámara, es necesario realizar una nueva curva de calibración ya que la técnica se basa en principios ópticos por lo que las distancias relativas entre laser, cámara y modelo son inamovibles.

La instalación del sistema fue la referida en la *Figura 21*, incluyendo el láser y cámara (filtro óptico) con incidencia y enfoque perpendicular al modelo respectivamente para finalmente realizar el ajuste de la posición del modelo para calibrar en el plano central. Previo a poner la tapa con los termopares, sobre el plano de medición se coloca el dispositivo de la *Figura 34* que cuenta con una regla para realizar el enfoque con el lente, que se ajusta de manera que sea posible distinguir enfocados nítidamente

los números de la regla. Es entonces que la tapa con los termopares es colocada para que cualquier cambio que estos puedan llegar a causar en el baño sea tomado en cuenta para la construcción de la curva de calibración, es decir, la calibración debe hacerse con los termopares insertados en el caso de los experimentos de validación. Los termopares se ubican en la misma posición en la que van a ser ubicados durante el experimento., evitando al máximo el movimiento de estos. En esta ocasión la posición radial de los termopares fue la referida en la *Figura 35*. La altura de los termopares varía dependiendo lo que se requiera estudiar, no obstante, la posición de los termopares durante la calibración no es modificada para los experimentos posteriores.

Para la calibración se tomaron en cuenta 4 temperaturas: 22 (temperatura ambiente), 30, 40 y 50°C.

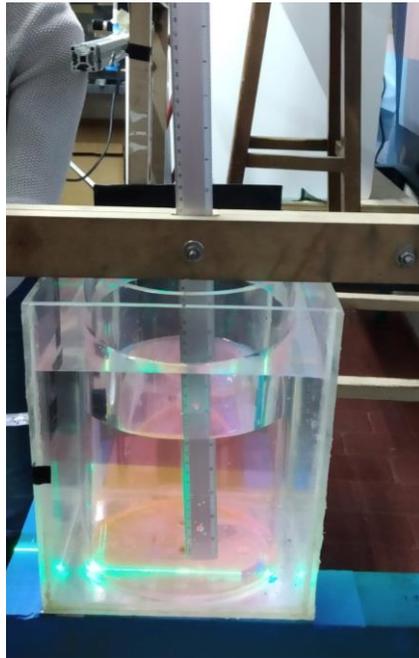


Figura 34. Regla sobre el plano en una estructura de madera para realizar el enfoque.

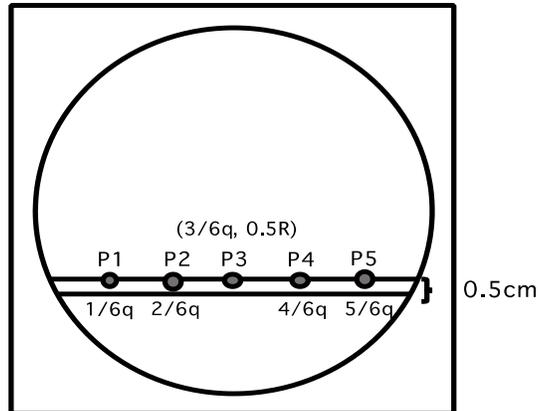


Figura 35. Distribución radial de los termopares y su posición respecto al plano de medición.

Para la temperatura más baja simplemente se vació la solución en el cilindro hasta alcanzar la temperatura del baño y se complementó llenando la chaqueta con agua destilada hasta alcanzar una altura ligeramente mayor a la del baño y se aplicó la técnica de medición de PLIF térmico (*TM PLIF*).

La evaluación a diferentes temperaturas se realizó de manera gradual de menor a mayor. La siguiente temperatura trabajada fue 30°C. El calentamiento de la solución se hizo de forma in situ; para esto se ocupó el calentador de resistencia y propela sostenido por la estructura de la tapa metálica. Este calentador homogeniza el baño a la temperatura que se le indica, en este caso, 30 °C y con un termómetro se monitoreó la temperatura en varios puntos del modelo durante la homogenización. Una vez terminado el tiempo de homogenización, se realizó una vez más *TM PLIF*. Este procedimiento fue repetido con las cuatro temperaturas restantes. El agua de la chaqueta no fue cambiada durante el proceso.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Escala del modelo: 1/17
- Altura del baño H_b : 16.98 cm
- Concentración de Rodamina B: 200 $\mu\text{g/L}$
- Tiempo de homogenización: 5 minutos

- Tiempo de grabación aproximado: 5 segundos

A pesar de que en esta etapa de calibración no se utiliza el calentador, es recomendable ya tenerlo instalado en la tapa para evitar el máximo de movimiento de los termopares que pudiera haber si el dispositivo de calentamiento es ajustado después de la calibración.

A las grabaciones obtenidas se les realizó la conversión a imágenes, escala de grises y recorte antes detallados, llevando a cabo la captura de foto cada 0.1 segundos.

Procesamiento de imágenes

El código de MATLAB® empleado para procesar las imágenes de calibración realiza básicamente las siguientes acciones:

- Asigna el valor más bajo de pixel (cero) al negro y el más alto (255) al blanco (nivel de luminosidad).
- Todas las imágenes de una misma temperatura son malladas en una cuadrícula de 100x100, esto como consecuencia de la variación de fluorescencia que se presenta en el plano, aún y cuando éste tiene homogenizada una temperatura en todo el plano y de hecho en todo el volumen de la olla. Esto se debe a que el láser no genera una iluminación uniforme y también a que el modelo presenta imperfecciones en el acrílico que generan sombras y éstas hacen una iluminación no uniforme, lo que a su vez obliga a calibrar en cada celda de una malla en que se divide el plano, suponiendo que cada celda es tan pequeña que ahí si hay uniformidad de iluminación.
- La posición de los nodos de estas imágenes es adimensionalizada en dos direcciones.
- Cada elemento de la cuadrícula es analizado con su coloración promedio y le asigna un valor de 0 a 255. Realiza lo mismo con

todas las imágenes de la misma temperatura y obtiene una desviación estándar para cada punto.

- Asocia posición y luminosidad local a la temperatura que se esté procesando.
- Ajusta los valores de luminosidad en un rango de 0 a 1.
- Obtiene un valor promedio de luminosidad de toda la imagen con su respectiva desviación estándar y la asocia a una temperatura.
- Repite este proceso con todas las temperaturas.
- Obtiene curvas de calibración para cada elemento de la malla y una curva de calibración total promedio de la superficie completa.

2.5 Calentamiento agitado con gas

Para la comprobación del funcionamiento de la técnica en el modelado físico del horno olla, se llevó a cabo la prueba con inyección de aire (en dos posiciones diferentes) durante el calentamiento del fluido con una flama ardiendo encima de la superficie libre del agua, además de una prueba de enfriamiento al aire, de igual manera con inyección central de aire [Figura 36].

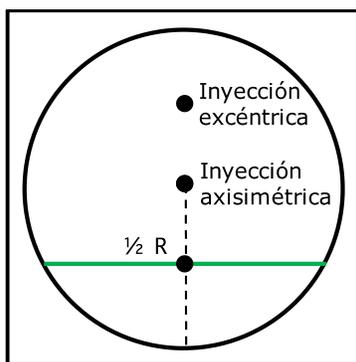


Figura 36. Posiciones de los puntos de inyección ubicados junto al plano de medición.

Se mantuvo el sistema ya instalado [Figura 21] y se procedió al cambio de solución por una a temperatura ambiente (en el caso del calentamiento) o se mantuvo la disolución caliente; donde el mezclado térmico fue inducido a través de realizar una inyección de aire por la parte inferior del modelo; con la boquilla del dispositivo de calentamiento ubicado en el centro del baño a 5 cm de la superficie de la solución. Primero se encendió el compresor de aire, se ajustó el flujo y se conectó a la conexión rápida "hembra" por medio de un conector "macho"; se dejó estabilizar el flujo de aire por aproximadamente 3 minutos. La medición con la técnica (TM PLIF) inició al momento de colocar la flama en la posición antes referida, con previa ignición estable de la flama sin ser colocada en el modelo y ardiendo con una longitud visible de alrededor de 9 cm de flama con propósito de garantizar reproducibilidad en los

experimentos [Figura 37]. En la *Tabla 5* se especifican las características de cada experimento.



Figura 37. Referencia del largo de la flama.

Tabla 5. Condiciones experimentales para cada prueba llevada a cabo.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Posición radial del plano de medición r/R	0.5	0.5	0.5
Posición radial del tapón r/R	0	0.5	0
Altura del baño [cm]	16.98	16.98	16.98
Flujo de aire [LPM]	1.54	1.54	1.54
Proceso	Calentamiento	Calentamiento	Enfriamiento
Medio temperante	Quemador de gas	Quemador de gas	Bolsa de hielo en la superficie
Temperatura inicial [°C]	27.21	27.04	52
Tiempo de proceso [min]	10	10	5
Tiempo de grabación [min]	10	10	5
Vista lateral de la posición de los termopares			

Posteriormente, todos los videos fueron pre procesados obteniendo imágenes cada 1 segundo, convirtiendo a escala de grises, recortando y enmascarando los termopares. Lo anterior por medio de los softwares antes mencionados Free Video to JPG Converter y XnConvert®.

Procesamiento de imágenes

La primera parte del código de MATLAB® es similar al usado para la curva de calibración, sin embargo, hay algunas diferencias que se mencionan a continuación:

- Asigna el valor más bajo de píxel (cero) al negro y el más alto (255) al blanco (nivel de luminosidad).
- Las imágenes son malladas en una cuadrícula de 100x100.
- La posición de los nodos es adimensionalizada en dos direcciones.
- Cada elemento de la cuadrícula es analizado con la coloración promedio, le asigna un valor de 0 a 255 y obtiene una desviación estándar para cada punto a un mismo tiempo.
- Asocia posición y luminosidad a un tiempo que va aumentando 1 segundo por cada imagen que se procesa.
- Ajusta los valores de luminosidad en un rango de 0 a 1.
- Realiza una interpolación con las curvas de calibración locales por medio de una regresión polinómica de segundo orden y asocia luminosidad-tiempo-temperatura.
- Genera un mapa de temperaturas.
- Obtiene un valor promedio de luminosidad de toda la imagen con su respectiva desviación estándar y le asocia un tiempo.
- Realiza una interpolación de la luminosidad promedio de la superficie con la curva de calibración total de la superficie para asociar luminosidad-tiempo-temperatura promedio

- Genera un gráfico de temperatura promedio del baño en función del tiempo.

La obtención del porcentaje de error y el ΔT de los resultados de la técnica PLIF respecto a los conseguidos con los termopares, se definió de la siguiente forma:

$$\%Error = \left| \frac{T_{termop,t} - T_{PLIF,t}}{T_{termop,t}} \right| * 100$$

$$\Delta T = T_{termop,n} - T_{PLIF,n}$$

Donde:

$T_{termop,n}$ = Temperatura del termopar a un tiempo t [$^{\circ}C$]

$T_{PLIF,t}$ = Temperatura de PLIF a un tiempo t [$^{\circ}C$]

ΔT = Diferencia de temperatura entre ambas técnicas (PLIF y termopar) [$^{\circ}C$]

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Calibración

En la *Figura 38* es posible observar un ejemplo de la curva de calibración obtenida del promedio de intensidad luminosa de todo el plano para la prueba de calentamiento; en ellas se presenta un comportamiento sin grandes fluctuaciones de luminosidad con una tendencia general de disminución de la fluorescencia al incrementar la temperatura, sin embargo, es importante señalar que la desviación estándar obtenida es muy elevada, esto tiene su explicación en que idealmente al incidir el láser sobre el modelo, si el baño se encuentra a una misma temperatura, la luminosidad debe ser uniforme en todo el plano, sin embargo, en la *Figura 39* se advierte que esto no sucede; lo anterior es derivado de causas relacionadas con la óptica del láser bastante complicadas de corregir y mantener, entre ellas, la falta de uniformidad del plano de luz generado. En la *Figura* antes mencionada se observa la tendencia de aumento de luminosidad en la parte izquierda central del plano para disminuir gradualmente en el resto del plano; esta variación incrementa la desviación estándar de la luminosidad del plano completo. Esta es la razón de realizar un mallado al plano, reducir el área considerada para la calibración específica y obtener curvas locales ya que, como se puede observar en el ejemplo de la *Figura 40* (calibración en dos celdas distintas de la malla creada), el simple hecho de que las posiciones sean diferentes implica una diferencia en la luminosidad emitida; siendo además latente la disminución de la desviación estándar en un aproximado del 90%.

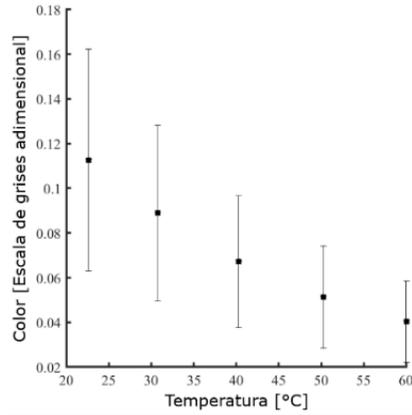


Figura 38. Curva de calibración total sobre el plano de medición.

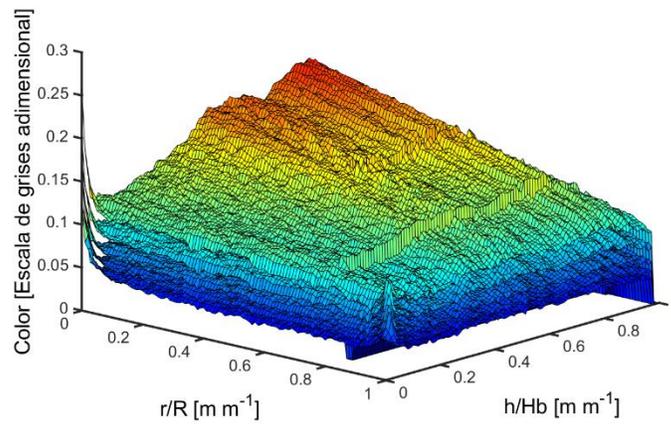


Figura 39. Intensidades luminosas del plano obtenidas para la calibración sobre el plano de medición.

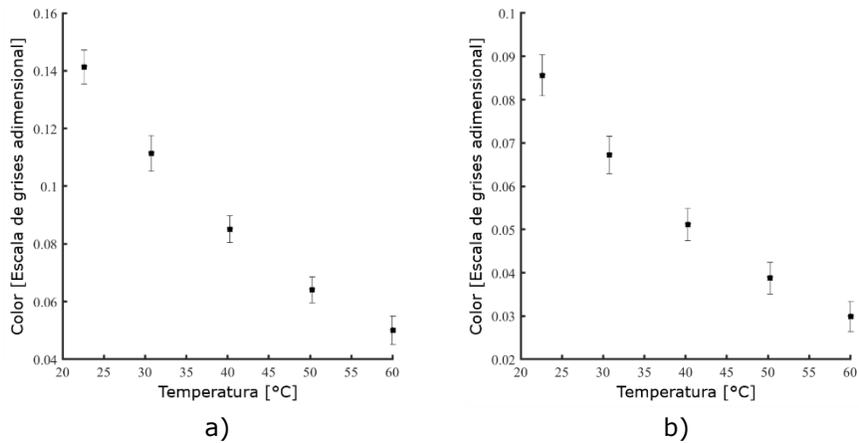


Figura 40. Curvas de temperatura locales para dos celdas en el plano (posición adimensional) a) (0.5, 0.5) b) (0.1, 0.1).

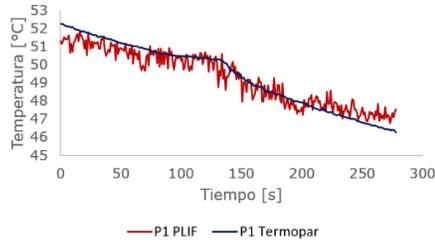
3.2 Validación de la técnica

La implementación de la técnica para modelar el Horno Olla involucra tener la certeza de que el PLIF térmico está arrojando resultados congruentes y apegados a la realidad física, lo cual fue posible al comparar sus predicciones contra mediciones provenientes de termopares tipo K. A partir de las *Figuras 41 y 42* se analiza la evolución en el tiempo de la temperatura del baño en condiciones de enfriamiento y un caso de calentamiento.

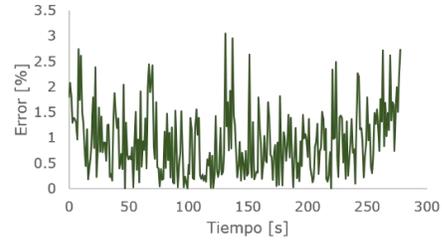
Las curvas térmicas del enfriamiento muestran en general un decaimiento fluctuante de la temperatura con PLIF térmico, a diferencia de los resultados obtenidos con termopares. Estas fluctuaciones se pueden deber a diversas razones como destellos generados por agentes externos, así como el área de malla considerada para obtener la luminosidad promedio y por ende la temperatura.

El ΔT promedio entre ambos métodos en el enfriamiento fue en casi todos los puntos, menor a 1°C ; con un error promedio que oscila en general entre 0.9-1.40% y un error máximo entre 3-4.5% [*Tabla 6*].

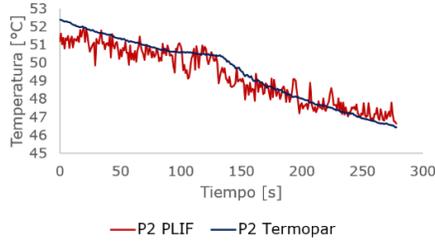
El cambio de pendiente presente en los 5 casos se debió a la renovación del medio de enfriamiento, lo que ocasionó un incremento en la rapidez de descenso de temperatura. La técnica PLIF en las posiciones 1, 2, 3 y 5 se acopló adecuadamente a este cambio, solo en el caso de la posición número 4, el PLIF térmico disminuyó la lectura de temperatura probablemente como consecuencia de un movimiento ligero del termopar respecto al punto de medición, justamente este es el punto que sale de los rangos de porcentaje de error previamente mencionados, alcanzando un error de 7.46% y aumentando el error promedio a 2.21%, he ahí la importancia de que ningún elemento sea movido durante los ensayos.



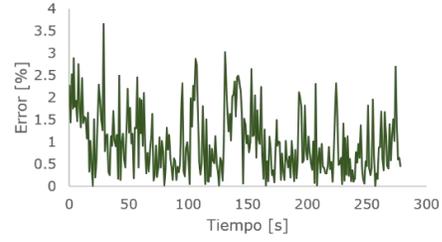
a.1)



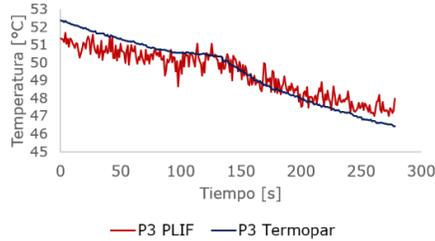
a.2)



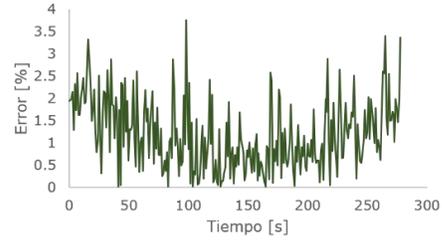
b.1)



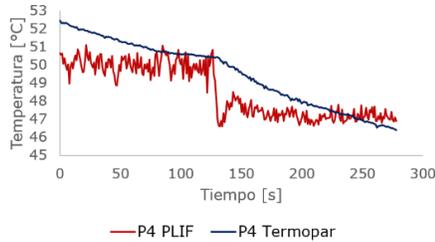
b.2)



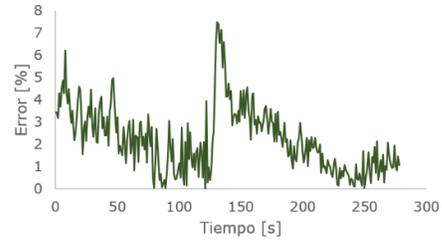
c.1)



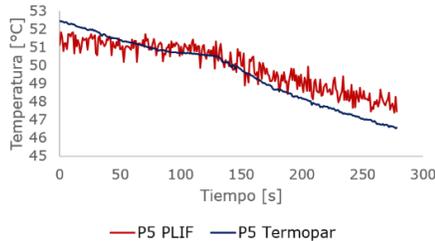
c.2)



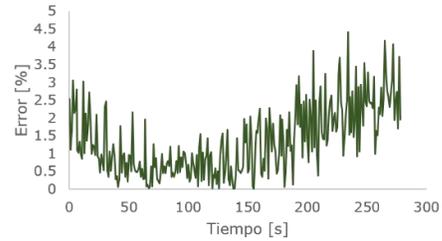
d.1)



d.2)



e.1)



e.2)

Figura 41. Validación de la técnica para el calentamiento con inyección axisimétrica. a.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 1. a.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 1. b.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 2. b.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 2. c.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 3. c.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 3. d.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 4. d.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 4. e.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 5. e.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 5.

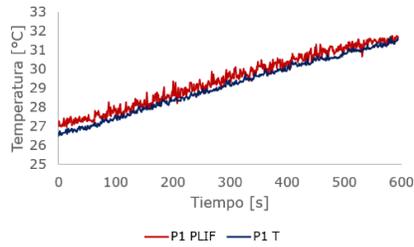
Tabla 6. Error máximo y promedio respecto al termopar para los 5 puntos durante el enfriamiento.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Error máx. [%]	3.05	3.66	3.75	7.46	4.42
Error prom. [%]	0.93	0.99	1.19	2.21	1.34

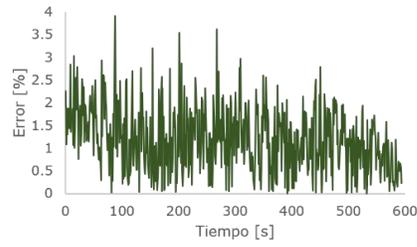
En el caso del calentamiento [Figura 42] se aprecia un incremento gradual, prácticamente lineal, de la temperatura con una rampa térmica promedio de $0.50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para los 5 puntos. En estas curvas las fluctuaciones de temperatura registradas por el PLIF no son tan latentes como durante el enfriamiento; lo cual puede ser debido a que el medio temperante para el calentamiento no es intrusivo a diferencia del enfriamiento donde la bolsa de hielo se encuentra sumergida con el burbujeo central impactándola directamente causando así gran ruido en los resultados.

Durante el calentamiento el ΔT promedio en técnicas contemplando las 5 posiciones fue de 0.30°C con un error promedio que varía entre 0.6-1.5% y un error máximo entre 2.6-4.2% [Tabla 7], sin haber algún caso extraordinario que saliera de estos rangos; y además disminuyendo sus valores respecto al enfriamiento con agitación.

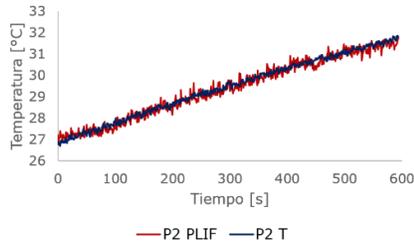
En las curvas es posible observar una tendencia al aumento del error especialmente en las posiciones 4 y 5, que son los que están más profundos en el baño; con la curva generada por PLIF siendo menor a la obtenida por medio del termopar. Dado que en la técnica menor temperatura implica mayor luminosidad, lo anterior es posible que ocurra porque en las esquinas del fondo del modelo se generan brillos que pudieran llegar a afectar ligeramente la luminosidad de las zonas más cercanas; que a su vez se ve afectado por el burbujeo y la turbulencia que este genera.



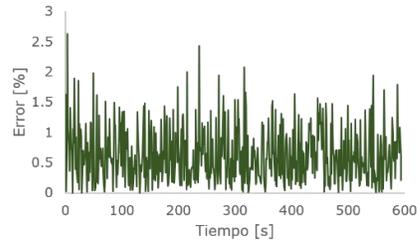
a.1)



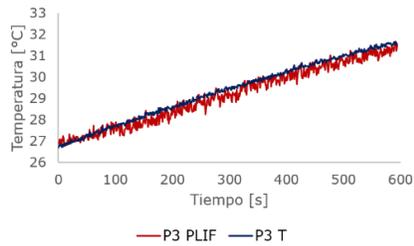
a.2)



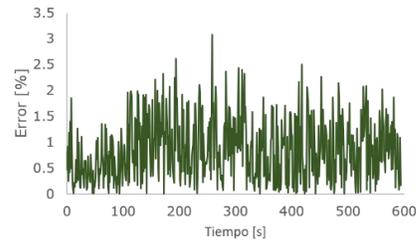
b.1)



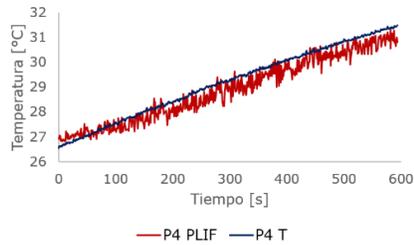
b.2)



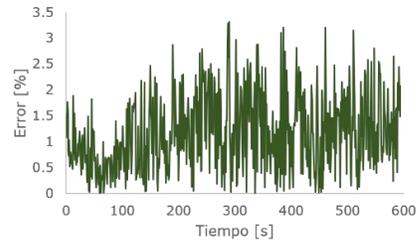
c.1)



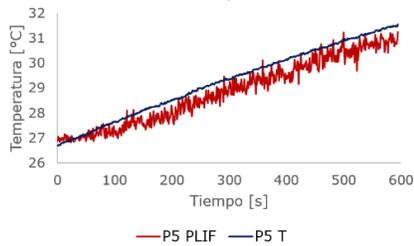
c.2)



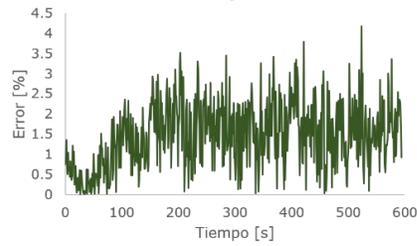
d.1)



d.2)



e.1)



e.2)

Figura 42. Validación de la técnica para el calentamiento con inyección excéntrica. a.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 1. a.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 1. b.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 2. b.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 2. c.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 3. c.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 3. d.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 4. d.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 4. e.1) Comparación de temperaturas entre PLIF y termopar en el punto 5. e.1) %Error del PLIF térmico respecto al termopar en el punto 5.

Tabla 7. Error máximo y promedio respecto al termopar para los 5 puntos durante el calentamiento excéntrico.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
Error máx. [%]	3.91	2.62	3.08	3.31	4.18
Error prom. [%]	1.20	0.63	0.86	1.17	1.47

3.3 Evolución térmica del calentamiento agitado con gas

Dado que se busca aplicar la técnica PLIF térmico en el modelado físico del Horno Olla, el caso de interés en esta ocasión es el del calentamiento y la obtención de planos de temperatura sin las zonas “muertas” generadas por algún sensor. Como se especificó anteriormente, para probar la técnica se hicieron experimentos sobre un mismo plano (R/2) con un solo tapón en dos puntos de inyección distintos: céntrico y excéntrico.

La fluidodinámica del sistema es fundamental al momento de estudiar el fenómeno de mezclado debido a que es la que lo propicia. La información obtenida por medio de este ámbito [27] ayudará a explicar los fenómenos que más adelante se presentarán en los resultados.

3.3.1 Inyección axisimétrica

En los contornos presentados en la *Figura 43*, se observa el aumento gradual de la temperatura donde se aprecia que hasta los 90 segundos el calentamiento se distribuye uniformemente en el baño. A partir de ese momento y hasta los 180 segundos, comienza una tendencia a haber zonas más calientes en las paredes y sobre la línea de partición central horizontal. En la *Figura 44* se presenta el esquema de los planos sobre los que se obtuvieron patrones de fluidodinámica, la cual explica la cuestión anterior por medio de los perfiles de velocidad de la *Figura 45* y la convección forzada generada por la corriente de recirculación que se produce al realizar el burbujeo. También cabe señalar que la zona

afectada por el calor de la flama no se ve, porque como se explicó anteriormente se enmascaró.

Existe la formación de dos movimientos de recirculación del fluido, que directamente recibe el calentamiento por parte de la flama, a aproximadamente $\frac{3}{4}$ de altura del baño; los cuales son generados a partir del movimiento ascendente de la fase fluido-gas en la parte central. La formación de estas recirculaciones genera distintas zonas del baño donde la magnitud de velocidad del fluido varía. En los incisos c) y d) es más claro el patrón de movimiento del fluido en el baño; donde la formación de remolinos con recirculación descendente hacia las paredes del modelo hasta la mitad del baño donde la mayor parte del fluido vuelve a ser arrastrado hacia la superficie con una temperatura menor por el contacto con aire de menor temperatura obteniendo un patrón muy similar al de los contornos de temperatura. De forma consiguiente, se pueden identificar las siguientes zonas en el experimento:

- En las esquinas del baño prácticamente no hay movimiento del fluido
- En la parte superior de las paredes se concentra el flujo con mayor velocidad de recirculación
- Al llegar a las zonas más bajas del baño, la velocidad del fluido en el baño disminuye al haber dispersión de la energía cinética turbulenta.
- Los centros de los remolinos se pueden considerar como zonas de alta turbulencia donde también se lleva a cabo el mezclado químico y térmico.

A medida que avanza el tiempo, la recirculación y turbulencia en el baño favorecen el incremento más homogéneo de la temperatura.

Adicionalmente se presentan los resultados de fluidodinámica para la inyección axisimétrica con el plano de medición sobre la pluma [*Figura 46*]. En estos contornos se observa la formación del mismo patrón del movimiento del flujo, sin embargo, la magnitud de los vectores cambia; en este caso, la mayor velocidad del fluido se concentra notablemente en el movimiento ascendente de la pluma de aire, siguiéndole (con menor magnitud) la zona de recirculación descendente del fluido en las paredes. Igualmente es de utilidad saber gracias a la *Figura 46d* que sobre este plano la zona de mayor turbulencia y donde principalmente se lleva a cabo el mezclado térmico es la de la pluma, incluso en mayor medida que en el plano 1; tal como es posible examinar en *Tabla 8* pues los valores promedio de velocidad y energía cinética turbulenta son mayores en el plano que se encuentra sobre la pluma.

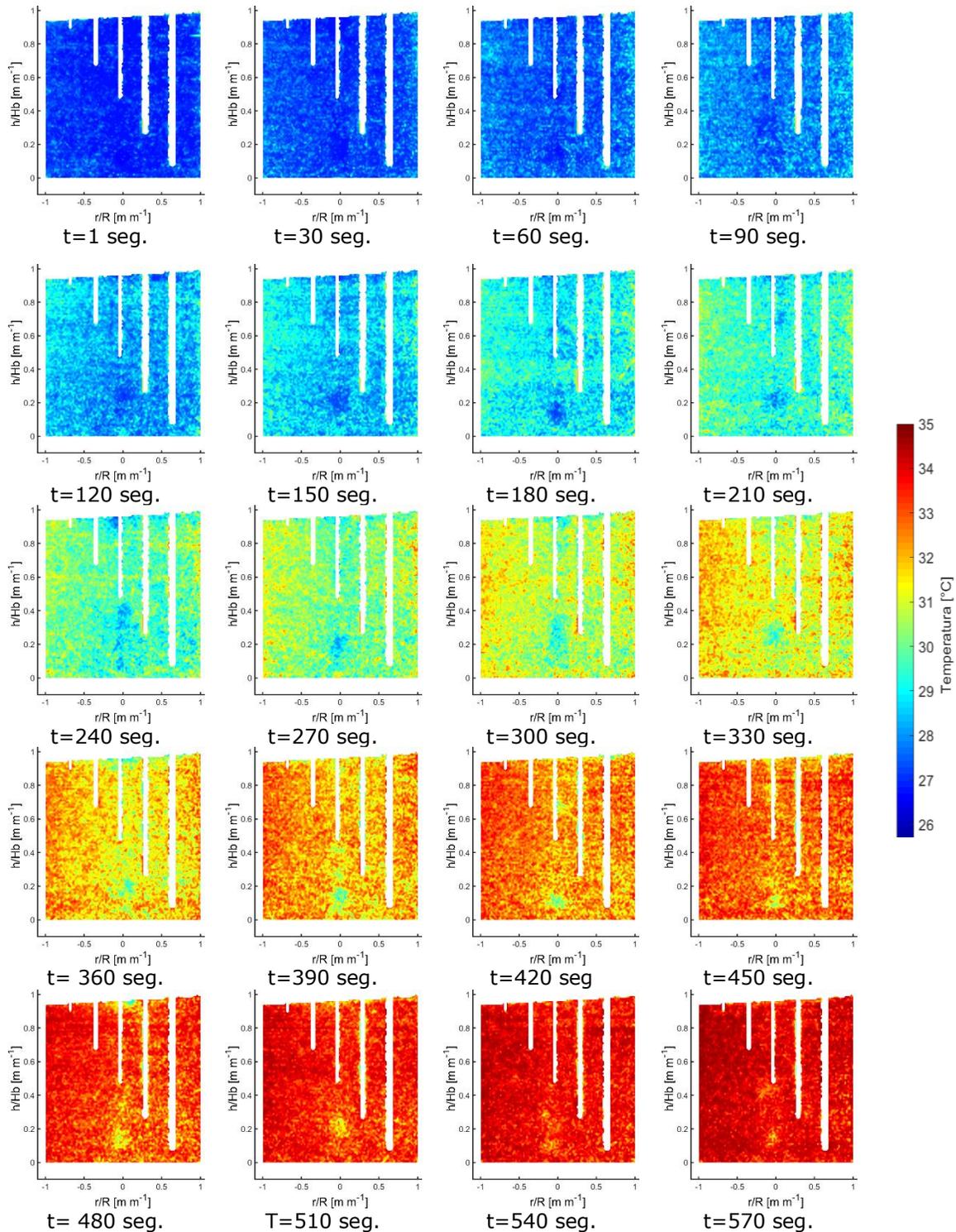


Figura 43. Contornos de temperatura para la historia térmica del calentamiento del Horno Olla con agitación céntrica a 1.54 LPM.

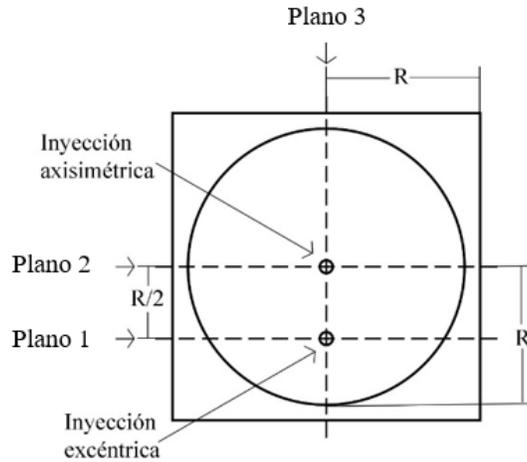


Figura 44. Planos de medición y puntos de inyección usados en las mediciones de fluidodinámica.

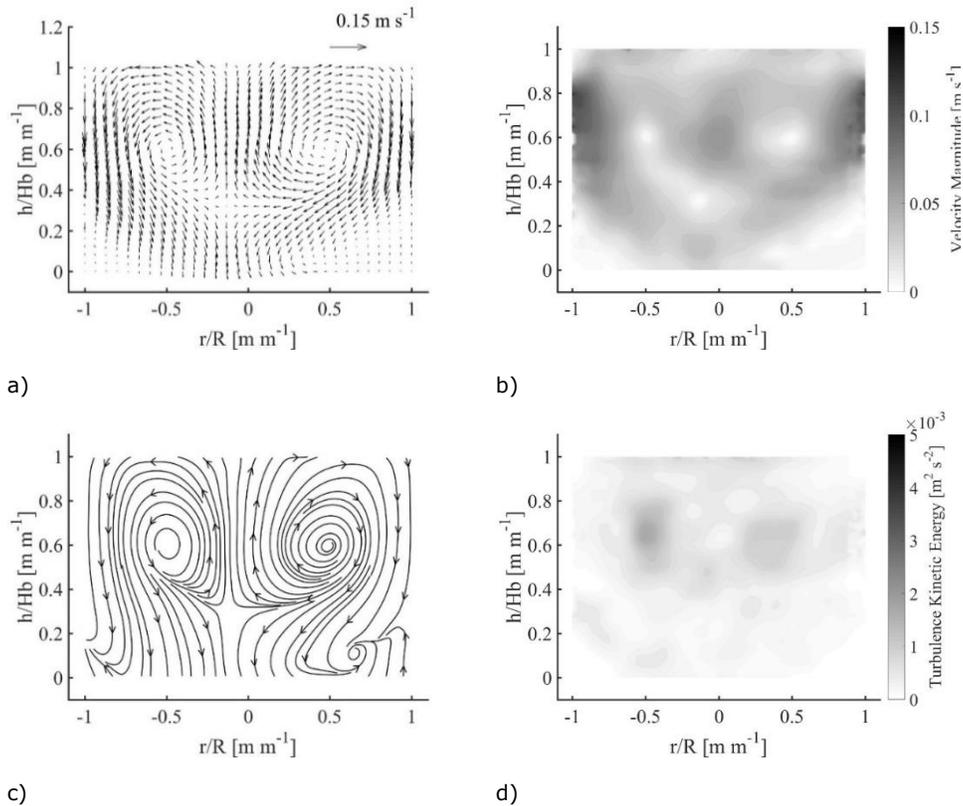


Figura 45. Fluidodinámica del caso de agitación de un modelo de Horno Olla en el plano 1 con inyección de gas céntrica. a) Vectores de velocidad en el fluido b) Contorno de velocidad c) Líneas de corriente d) Contorno de Energía Cinética Turbulenta.

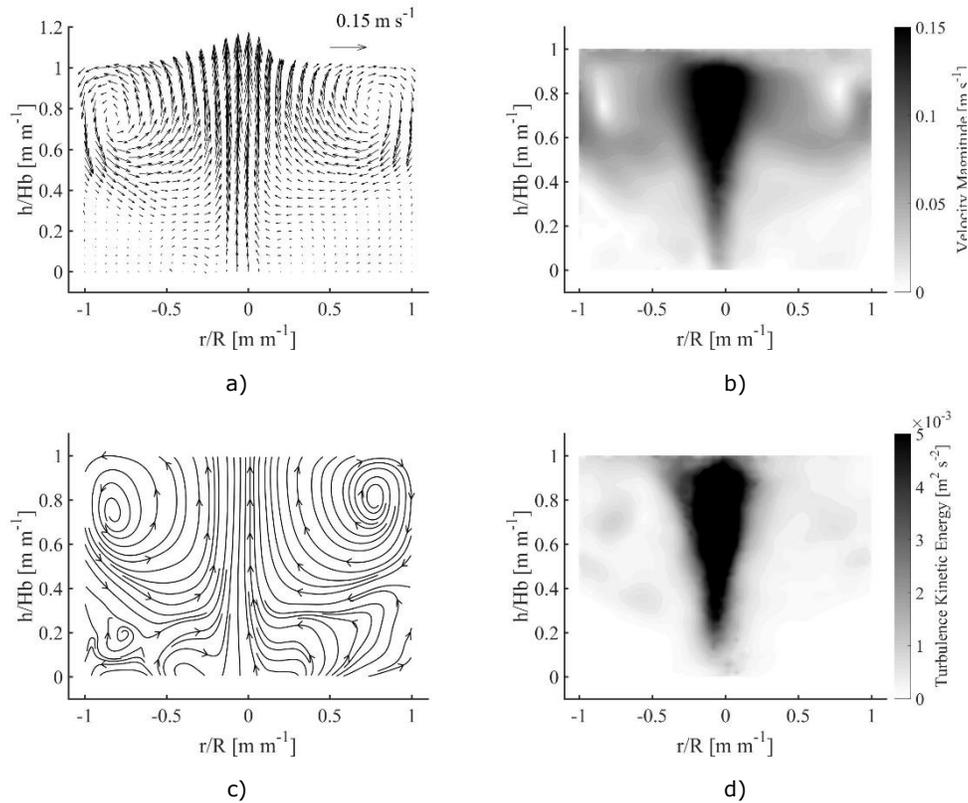


Figura 46. Fluidodinámica del caso de agitación de un modelo de Horno Olla en el plano 2 con inyección de gas céntrica. a) Vectores de velocidad en el fluido b) Contorno de velocidad c) Líneas de corriente d) Contorno de Energía Cinética Turbulenta.

Tabla 8. Velocidad y Energía Cinética Turbulenta promedio para la inyección axisimétrica en dos planos.

Posición radial de inyección r/R	Plano	$v \times 10^{-2} [m s^{-1}]$	$k \times 10^{-3} [m^2 s^{-2}]$
0	1	3.50 ± 2.13	0.39 ± 0.34
0	2	4.75 ± 3.02	1.17 ± 0.69

En la *Figura 47* se presenta la curva de calentamiento promedio del plano 1 con su respectiva desviación estándar en la cual hay la formación de tres zonas de diferente pendiente. Las pendientes de calentamiento para los segmentos A, B y C fueron 0.62 , 0.85 y $0.52^{\circ}C/min$ respectivamente. En la primera zona (A) que es el comienzo, el calentamiento tiene un comportamiento distinto a comparación de la zona B, donde incluso la desviación estándar disminuye para después aumentar y al mismo tiempo

cambiar la pendiente de la curva, esto debido a la diferencia inicial de temperaturas en el plano, apenas iniciar la etapa de mezclado. Después de los 180 segundos previamente mencionados, al haber una reducción en el gradiente de temperatura la historia térmica promedio del plano experimenta un calentamiento más uniforme tal como se advirtió en la *Figura 43*. Para la zona C la tendencia vuelve a modificarse probablemente como consecuencia de la disminución del ΔT y la consecuente estabilización del baño y el aumento de las pérdidas de calor por convección en la superficie. Esto último es representado en la ecuación general de balance de energía de este caso:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

Hacia el final de la prueba pareciera ya no haber calentamiento, esto significa que el término de acumulación disminuye para aumentar el de la salida (el término de entrada se mantiene relativamente constante) para así entonces el sistema comenzar a entrar en estado estacionario de transporte de energía.

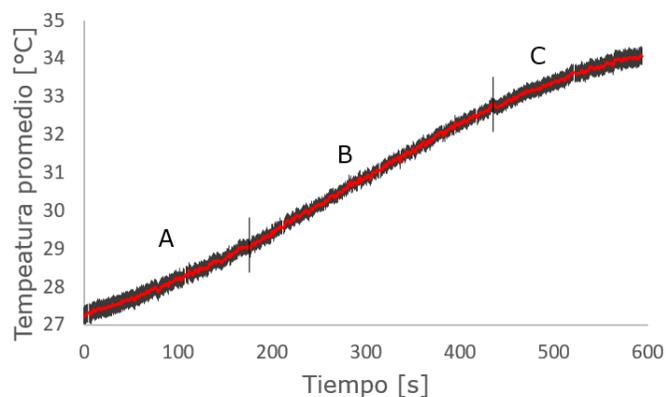


Figura 47. Temperatura promedio del plano durante el calentamiento axisimétrico.

3.3.2 Inyección excéntrica

Los contornos de temperatura para la inyección excéntrica de aire se muestran en la *Figura 48*. En estos se percibe un aumento gradual casi homogéneo de la temperatura.

Los resultados de fluidodinámica para la *Figura 49* son útiles para apreciar qué tan separado se encuentra el plano 1 del punto de inyección y ver qué ocurre en ese punto. La pluma ascendente de aire tiene la tendencia a desplazarse hacia la pared del modelo, lado contrario de donde se ubica el plano 1, es en este tramo donde se concentra el movimiento del fluido el mayor movimiento del fluido. Por lo mismo del contacto de parte de la pluma con el modelo, la recirculación generada pierde inercia; aunque logrando generar líneas de recirculación hacia la pluma y un pequeño remolino en la parte superior que no se extiende para recircular totalmente hasta la pluma. Claramente para el plano 3 de medición la zona de mayor mezclado es la de la pluma, siguiéndole en considerablemente menor medida la superficie.

Considerando la posición del plano 1, se observa que este es atravesado por corrientes de recirculación y, sin embargo, al analizar la fluidodinámica de la *Figura 50* (ubicado en un plano $0.5R$ más cercano que el plano 1 de medición), se observa que en ese plano hay la formación de diversos remolinos por lo que es muy probable que el movimiento del fluido sea en forma de espiral cónica de apertura grande (siguiendo el patrón de flujo envolvente), con una considerable disminución de la magnitud de velocidad respecto al experimento de inyección axisimétrica. Ante la ausencia de la pluma en este plano, la zona de turbulencia y por ende donde ocurre el mezclado térmico es en la superficie seguida, en mucho menor medida, de la parte central del plano, sin embargo, si se considera el plano 2, en este hay mayor mezclado [*Tabla 9*].

Considerando lo anterior, es factible que algo similar suceda en el plano 1 involucrando cierta diferencia en la parte superior ocasionada por el pequeño movimiento envolvente presente.

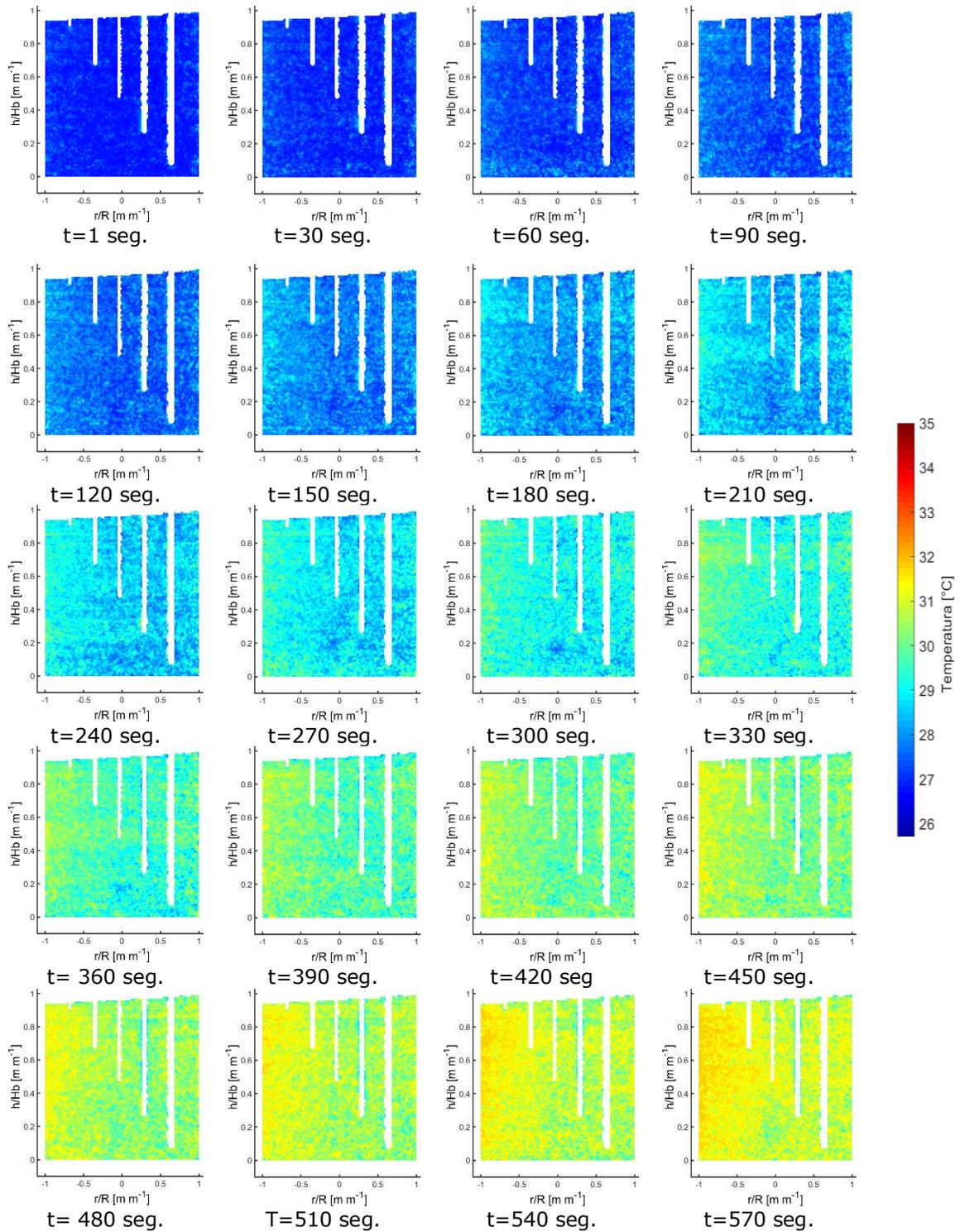


Figura 48. Contornos de temperatura para la historia térmica del calentamiento del Horno Olla con agitación excéntrica.

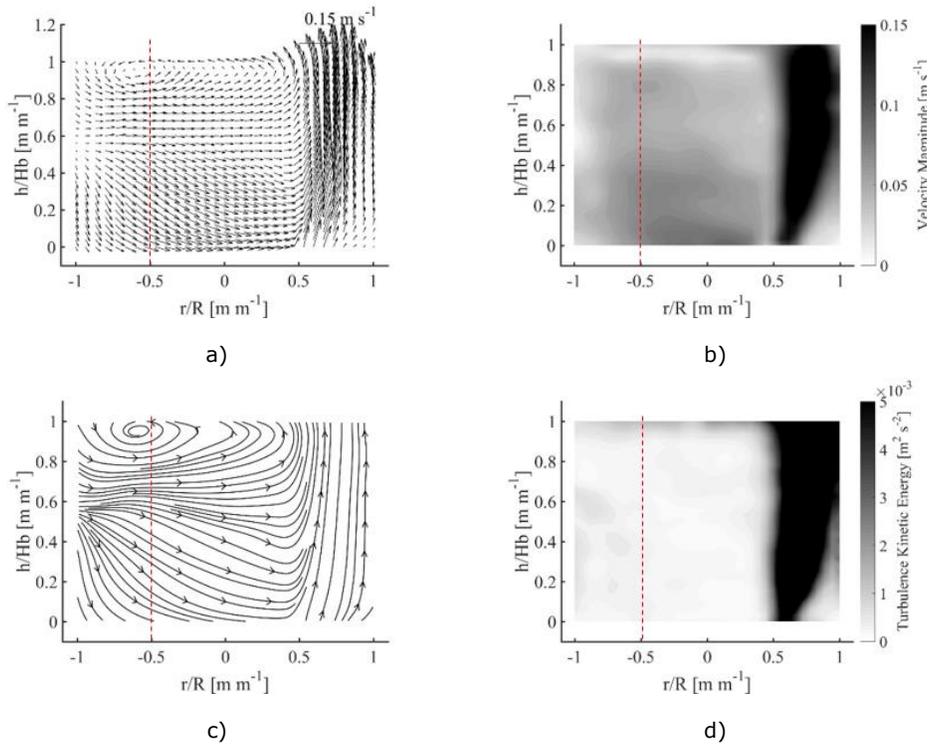


Figura 49. Fluidodinámica del caso de agitación de un modelo de Horno Olla en el plano 3 con inyección de gas excéntrica. a) Vectores de velocidad en el fluido b) Contorno de velocidad c) Líneas de corriente d) Contorno de Energía Cinética Turbulenta

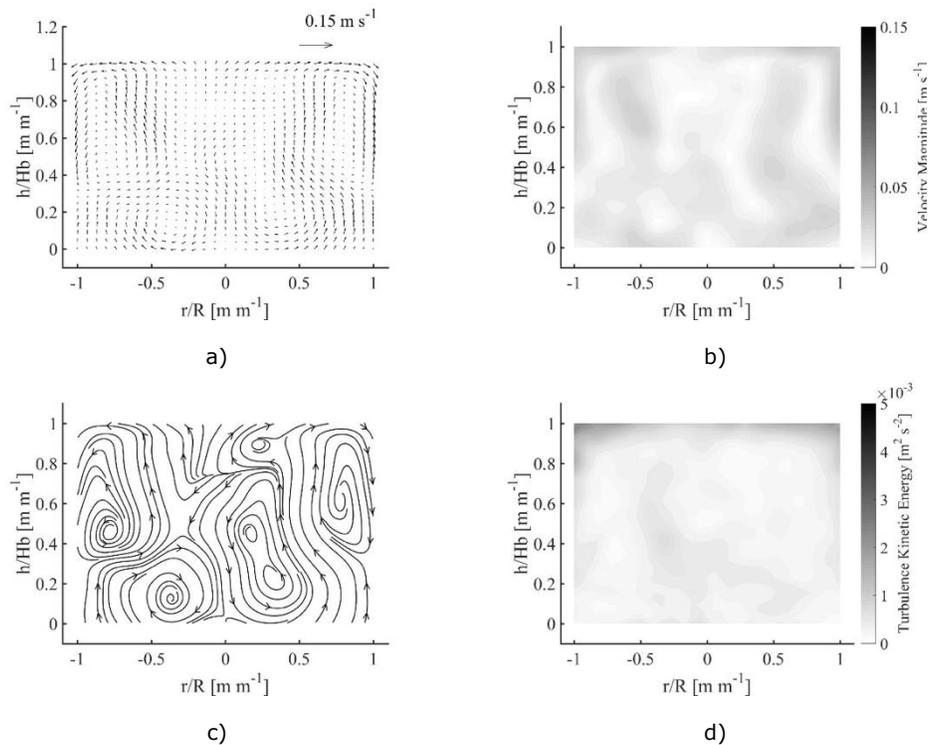


Figura 50. Fluidodinámica del caso de agitación de un modelo de Horno Olla en el plano 2 con inyección de gas excéntrica. a) Vectores de velocidad en el fluido b) Contorno de velocidad c) Líneas de corriente d) Contorno de Energía Cinética Turbulenta

Tabla 9. Velocidad y Energía Cinética Turbulenta promedio para la inyección excéntrica en dos planos.

Posición radial de inyección r/R	Plano	$v \times 10^{-2} \text{ [m s}^{-1}\text{]}$	$k \times 10^{-3} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-2}\text{]}$
0.5	2	1.46 ± 2.27	0.42 ± 0.39
0.5	3	6.82 ± 4.08	2.21 ± 1.25

Al igual que se sucedió al llevar a cabo la inyección axisimétrica, en la curva de temperatura promedio para la inyección axisimétrica también es presumible la formación de las mismas 3 zonas; las cuales involucran un ligero cambio de pendiente [Figura 51]. Las pendientes de calentamiento para los segmentos A, B y C fueron 0.38, 0.48 y 0.34 °C/min respectivamente. Como ya fue explicado, el primer cambio de pendiente se debe a una mayor homogenización de la temperatura del plano y la segunda modificación de pendiente es más factible que al incremento de la pérdida de energía por el movimiento de la superficie.

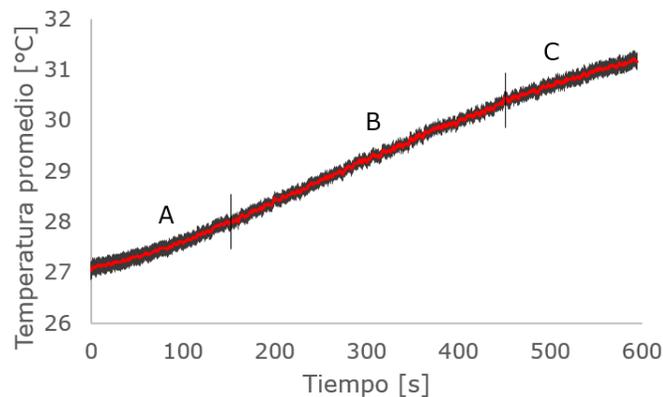


Figura 51. Temperatura promedio y desviación estándar del plano durante el calentamiento excéntrico.

Realizando la comparación entre las curvas de temperatura promedio de ambos experimentos de calentamiento [Figura 52] en un mismo lapso de tiempo, es perceptible un mayor aumento de temperatura al realizar inyección axisimétrica; obteniendo 2.72°C más en esta última [Tabla 10].

En esto se encuentran involucrados tanto la posición del quemador como la del plano.

El hecho de que el quemador se encuentre colocado justo encima del punto de inyección en el caso axisimétrico conlleva a que el fluido sea calentado directamente en el punto de mayor velocidad del baño y donde la recirculación inicia, de este modo, desde un principio el arrastre se ejerce sobre fluido caliente; al contrario de lo que sucede durante la inyección excéntrica que al aplicarse fuera de la zona de calentamiento, empieza a recircular fluido frío y en el lugar de calentamiento la magnitud de velocidad es menor y por ende lo es el arrastre.

Asimismo, tal como se explicó con anterioridad, la posición del plano respecto al punto de inyección como la ubicación de este mismo influyen en demasía sobre la fluidodinámica del plano de medición. La combinación de estos factores antes explicados deriva en la presencia de más áreas de mezclado en el plano con inyección axisimétrica que en la correspondiente excéntrica; como consecuencia, el gradiente de temperatura en el plano medición al realizar inyección céntrica disminuye respecto a la inyección excéntrica. De esta forma, al aplicar inyección en $R/2$ y por las condiciones de fluidodinámica previamente mencionadas, en el plano se generan zonas de temperatura fluctuante con valores que se alejan del resto del plano, aunado a esto, la presencia de cierta irregularidad en el brillo, y por ende de la temperatura (cómo es posible apreciar en la *Figura 48*), acentúa las oscilaciones de la temperatura promedio. Esta irregularidad del brillo puede ser debida a un ligero movimiento del acomodo óptico que, sin embargo, no alcanza a tener in impacto mayor en los resultados.

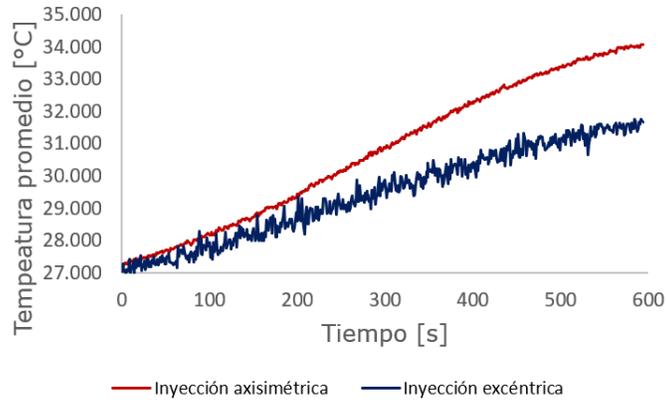


Figura 52. Comparación de las curvas de calentamiento en el plano R/2 usando dos tipos de inyección.

Tabla 10. Velocidad y Energía Cinética Turbulenta promedio para la inyección excéntrica en dos planos.

Posición radial del punto de inyección r/R	Temperatura promedio inicial [°C]	Temperatura promedio final [°C]	ΔT [°C]
0	27.21	34.06	6.85
0.5	27.04	31.17	4.13

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

La emisión de luminosidad en un plano por parte de la Rodamina B no siempre es homogénea en un baño isotérmico, por lo que se requirió la construcción de curvas de calibración locales en un mallado 100x100.

- La emisión de luz local y promedio de la Rodamina B, conforme a los resultados de las curvas de calibración, tiende a decrecer con el incremento de temperatura en un rango de 22 a 60°C a una concentración de 200 µg/L.

La diferencia de temperatura entre el PLIF y el experimento de validación instrumentado con termopares tipo K, fue en promedio de 0.46°C (tomando en cuenta tanto la agitación axisimétrica como excéntrica) con un error promedio de 1.32%; lo que es un indicio de la aproximación a la realidad física del fenómeno térmico por parte de la técnica PLIF, lo que a su vez habilita esta técnica a ser usada en modelado físico, por ser una técnica no intrusiva y que genera todo un plano con contornos de temperatura, los cuales pueden ser usados para validar modelos matemáticos de transferencia de calor y ayudar a entender el mezclado térmico a diferencia de las técnicas tradicionales para medir temperatura.

La técnica PLIF es viable para realizar modelado físico a escala 1/17 del fenómeno térmico del Horno Olla dado que, de acuerdo con los resultados obtenidos, es posible obtener una adecuada representación de los fenómenos de mezclado térmico por inyección de aire en ambos casos de inyección.

- La configuración de la flama del quemador y su posición son variables de importancia que repercuten en las historias térmicas obtenidas.

- Siendo la pluma generada por el burbujeo una zona de alta turbulencia y, por ende, un factor determinante en el mezclado térmico; la posición del plano de medición respecto al punto de inyección influye en los resultados de medición obtenidos. La diferencia de temperatura promedio entre el calentamiento axisimétrico y el excéntrico fue de 2.72°C , habiendo un mayor aumento de temperatura en el primer caso.
- La curva de calentamiento promedio no es completamente lineal debido a la estabilización del sistema y a la pérdida de energía asociada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Economics, «World Steel Association,» 13 Enero 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:fd44918-de3b-455b-9083-f770afa4a214/OE%2520Executive%2520Summary.pdf?fbclid=IwAR2ZNpO4IqknYo7SDPac5DlrTUA6aujaSjfl3CeCD7vieRbS4CyLVCpv-Mg>.
- [2] CANACERO, «CANACERO,» 2019. [En línea]. Disponible: https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/infografia_canacero_2019.pdf. [Último acceso: 25 Enero 2020].
- [3] J. Castañeda, «Alto Nivel,» [En línea]. Disponible: <https://www.altonivel.com.mx/empresas/cual-es-la-prueba-de-acero-de-la-industria-siderurgica-en-mexico/>. [Último acceso: 2020 Enero 23].
- [4] A. Ghosh y A. Chatterjee, de *Ironmaking and Steelmaking. Theory and Practice*, Nueva Delhi, PHI Learning Private Limited, 2008, pp. 3-23.
- [5] American Iron and Steel Institute, «American Iron and Steel Institute,» 31 Diciembre 2010. [En línea]. Disponible: <https://www.steel.org/~media/Files/AISI/Making%20Steel/TechReportResearchProgramFINAL.pdf>. [Último acceso: 2020 Enero 15].
- [6] A. Ghosh, de *Secondary Steelmaking. Principles and Applications*, USA, CRC Press, 2001, pp. 14-20.
- [7] X. Zhou, Z. Shi, G. Zhang, Y. Ding y Y. Yang, «The Introduction of the LF Refining Function and Process,» *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2651-653, pp. 181-184, 2014.
- [8] Y. Pan y B. Bjorkman, «Numerical Analysis on the Similarity between Steel Ladles and Hot-waterModels Regarding Natural convection Phenomena,» *ISIJ International*, vol. 42, nº 6, pp. 614-623, 2002.
- [9] D. Mazumdar y R. Guthrie, «The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems,» *ISIJ International*, vol. 35, nº 1, pp. 1-20, 1995.
- [10] Y. Liu, M. Ersson, H. Liu, P. Jönsson y Y. Gan, «A Review of Physical and Numerical Approaches for the Study of Gas Stirring in Ladle Metallurgy,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 50, nº 1, pp. 555-557, 2018.
- [11] D. Mazumdar y J. Evans, «Macroscopic Models for Gas Stirred Ladles,» *ISIJ International*, vol. 44, nº 3, pp. 447-461, 2004.
- [12] M. Iguchi, K. Nakamura y R. Tsujino, «Mixing Time and Fluid Flow Phenomena in Liquids of Varying Kinematic Viscosities Agitated by Bottom Gas Injection,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 29, nº 3, pp. 569-575, 1998.

- [13] V. Putan, L. Vilcenau y A. Socalici, «Mathematical and Physical Modeling of Thermal Stratification Phenomena in Steel Ladles,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 294, nº 1, pp. 1-8, 2018.
- [14] F. Maldonado, M. Ramírez, A. Conejo y C. González, «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*, vol. 51, nº 7, pp. 1110-1118, 2011.
- [15] J. Farrera, C. Hernández, E. Torres, E. Torres, N. López y M. Ramírez, «Analysis of Temperature Losses of the Liquid Steel in a Ladle Furnace during Desulfurization Stage,» *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 72, nº 4, pp. 899-909, 2019.
- [16] C. Grip, K. Jonsson, S. Eriksson, L. Jonsson, P. Jönsson y Y. Pan, «Theoretical and practical study of thermal stratification and drainage in ladles of different geometry,» *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 29, nº 1, pp. 30-38, 2000.
- [17] P. Karasso y M. Mungal, «PLIF measurements in aqueous flows using the Nd:YAG laser,» *Experiments in Fluids*, vol. 23, nº 5, pp. 382-387, 1997.
- [18] Dantec Dynamics, «DANTEC DYNAMICS,» [En línea]. Disponible: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-planar-lif>. [Último acceso: 2019 Marzo 21].
- [19] M. Bruchhausen, M. Guillard y F. Lemoine, «Instantaneous measurement of two-dimensional temperature distributions by means of two-color planar laser induced fluorescence (PLIF),» *Experiments in Fluids*, vol. 38, nº 1, pp. 123-131, 2004.
- [20] Dantec Dynamics, *Planar-LIF Software. Liquid Applications. Installation & User's Guide.*, Skovlunde, 2002.
- [21] Ajax Chemicals, Material Safety Data Sheets, Auburn: Ajax Chemicals Pty Ltd, 1994.
- [22] A. Kristoffersen, S. Erga, B. Hamre y O. Frette, «Testing Fluorescence Lifetime Standards using Two-Photon Excitation and Time-Domain Instrumentation: Rhodamine B, Coumarin 6 and Lucifer Yellow,» *Journal of Fluorescence*, vol. 24, nº 4, pp. 1015-1024, 2014.
- [23] J. Elliot, M. Gleiser y V. Ramakrishna, *Thermochemistry for Steelmaking: Thermodynamic and Transport Properties*, vol. 2, Addison-Wesley, 1963.
- [24] F. Richardson, *Physical Chemistry of Melts in Metallurgy*, Londres: Academic Press, 1974.
- [25] A. Amaro, *Modelación Física y Matemática del Mezclado y de Intercambios Metal/Escoria en Ollas de Acero Agitadas con Gas. Tesis de Doctorado en Ingeniería*, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [26] C. Ortiz, *Implementación de la Técnica PLIF para la Medición de Tiempos de Mezclado en un Modelo Físico de Horno Olla 1/6 y Comparación de la Misma con Técnicas Tradicionales de*

Medición de Tiempos de Mezclado. Tesis de Licenciatura, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.

- [27] R. Ávila, *Comparación entre la Técnica LIF y Técnicas Tradicionales para Medir el Tiempo de Mezclado en Modelos Físicos de Pllas Agitadas con Gas. Tesis de Licenciatura.*, Ciudad de México: UNAM, 2019.