



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EFECTO DEL FLUJO DE GAS, EL NÚMERO Y LA  
POSICIÓN DE INYECTORES SOBRE EL MEZCLADO  
TÉRMICO EN OLLAS AGITADAS CON GAS  
ASISTIDO POR LA TÉCNICA PLIF TÉRMICA”**

**TESIS**

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

**PRESENTA**

**SESANDARY GUADALUPE CATALÁN GODINEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX**

**AÑO 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Dr. Carlos González Rivera  
**VOCAL:** Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez  
**SECRETARIO:** M.EN I. José Alfredo Delgado Álvarez  
**1er SUPLENTE:** M.EN I. Diego Enrique González González  
**2° SUPLENTE:** Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO 203, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Dr. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA**

**SUSTENTANTE:**

**SESANDARY GUADALUPE CATALÁN GODINEZ**

Agradezco especialmente al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica –PAPIIT- por la beca de titulación otorgada a mi persona así como los recursos económicos aportados para la realización de este trabajo de tesis directamente relacionada con el proyecto “Determinación de tiempo de mezclado en ollas agitadas con gas mediante modelado matemático y físico con PLIF” con clave IN115619 a cargo del Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

# Contenido

Capítulo 1. Introducción	
1.1 Panorama económico de la siderurgia en México	1
1.2 Antecedentes históricos	1
1.3 Refinación primaria	2
1.4 Refinación secundaria	3
1.5 Horno olla	4
1.6 Estudios en ollas agitadas con gas	5
1.7 Generalidades de la técnica PLIF	12
1.8 Hipótesis	14
1.9 Objetivos	14
Capítulo 2. Metodología de trabajo	
2.1 Modelo físico	16
2.2 Criterios de similitud	18
2.3 Disposición experimental y descripción del procedimiento para la medición de temperaturas empleando la técnica PLIF en un modelo físico de olla agitada con gas.	19
2.4 Matriz Experimental	27
Capítulo 3. Resultados y discusión	
3.1 Resultados de Transferencia de Calor	29
3.2 Resultados de Transporte de Momentum	42
3.3 Análisis estadístico	52
3.4 Optimización de las condiciones de operación para el mezclado térmico.	56
3.5 Comparación de las condiciones óptimas entre el mezclado químico y térmico.	65
Capítulo 4. Conclusiones	66
Capítulo 5. Bibliografía	68
Apéndice A	72
Lista de Símbolos/abreviaturas	80

# 1. Introducción

## 1.1 Panorama económico de la siderurgia en México

De acuerdo a las cifras reportadas por la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero en 2018 México ocupa el 14° lugar en la producción mundial de acero, con una producción anual de 20.2 millones de toneladas de acero líquido, sin embargo, sólo 3.8 millones de toneladas son exportadas en productos terminados, mientras que se importan alrededor de 10.1 millones de toneladas de igual forma en productos terminados. La industria del acero representa el 2.1 % del Producto Interno Bruto Nacional y se estima emplea a alrededor de 672 mil personas de forma directa e indirecta.

Este material se emplea en diversos sectores siendo los principales la construcción (61.5%), seguida de la producción de diversos productos metálicos (18.8%), continuando con el sector automotriz (10.6%), la maquinaria mecánica (7.8%) y equipo eléctrico (1.3%). [1]

## 1.2 Antecedentes Históricos

Se ignora donde se inició la producción de acero por primera vez; sin embargo, su utilización y tratamiento ya tenían alto impacto en civilizaciones antiguas como la egipcia e india donde era implementado en herramientas simples.

Durante el imperio romano se desarrollaron los primeros conocimientos en metalurgia al templar el acero con la finalidad de reducir su fragilidad. Entre el siglo X-XIII la producción de acero y los conocimientos en metalurgia sentaron las bases para el crecimiento de diversas áreas en la economía de la edad media donde era implementado en usos ornamentales y en armería.

En el siglo XVIII el coque se usa por primera vez para fundir mineral de hierro reemplazando la madera y el carbón vegetal, los cuales escaseaban con más frecuencia. La demanda de acero de alta calidad se incrementó gracias a la invención del motor de vapor, siendo ambos clave para la Revolución Industrial.

Hasta entonces la fusión se realizaba en hornos de hogar abierto y en altos hornos arcaicos, teniendo como principales inconvenientes el bajo volumen de producción y el alto contenido de carbón en el material.

Ante la creciente demanda de acero de alta calidad propiciada por la Revolución Industrial, Henry Bessemer, un ingeniero británico, desarrolla la primera técnica de producción en masa del acero en 1850 derivada del proceso Bessemer el cuál consistía en insuflar aire en arrabio fundido con

el fin de oxidar el carbono y remover otras impurezas para producir acero.[2]

### **1.3 Refinación Primaria**

En la actualidad hay dos maneras de producir acero una denominada Ruta Integrada y otra No Integrada.

#### **A. Ruta Integrada**

La complejidad de esta ruta de aceración radica en el pre-procesamiento de las materias primas que se cargan en los hornos encargados de realizar la fusión, así como el subsecuente tratamiento de los productos de fusión. En esta Ruta Integrada se habla de dos procesos principales el de Alto Horno (BF) o de Reducción Directa (FDR).

En el Alto Horno se cargan: carbón de piedra el cual se transforma en coque por medio de la destilación seca en hornos especiales, mineral de hierro que se tritura, concentra, pelletiza y sinteriza en una planta alterna, y piedra caliza que también se somete a trituración y clasificación. En el BF estos materiales sufren transformaciones al ser insuflados con aire, el coque proporciona el agente reductor (C y CO) y es la fuente principal de calor, la caliza se funde junto con la ganga del mineral y la ceniza del coque para formar la escoria, mientras que el mineral proporciona el hierro al ser reducido de sus óxidos. De esta fusión se obtiene el arrabio o hierro de primera fusión, este producto se traslada a un horno básico de oxígeno (BOF) con la finalidad de eliminar el exceso de carbono y otras impurezas residuales.

En un horno de reducción directa además de las materias primas que se mencionan para el proceso de BF se precisa de la adición de gas natural para llevar a cabo la reducción del mineral, el metal no es fundido al no alcanzar las temperaturas necesarias para tal efecto, y lo que se produce es un sólido metálico conocido como hierro esponja, el cual es entonces trasladado a un horno de arco eléctrico (HAE) y en conjunto con la adición de chatarra se obtiene finalmente acero.

La ruta no integrada comprende únicamente el procesamiento de chatarra en HAE (c) donde se incide una potente corriente eléctrica, creando un arco, y de esta forma el calor generado funde la chatarra; la energía eléctrica suele complementarse con oxígeno y finos de carbono o quemadores de gas para proveer energía química más barata que la energía eléctrica cara, obteniendo acero líquido.

Una vez que se han obtenido los productos de esta refinación primaria el acero líquido con alto contenido de oxígeno y otras impurezas, se traslada a una estación de refinación secundaria (que se describe en la siguiente sección y que constituye el motivo de este trabajo), para posteriormente

llevarse a la máquina de colada continua la cual se encarga de distribuir el acero líquido de manera uniforme en los moldes para su solidificación. En la Figura 1.3.1 se ilustra de manera general y esquemática las rutas integradas y la no integrada para la producción de acero. [3]

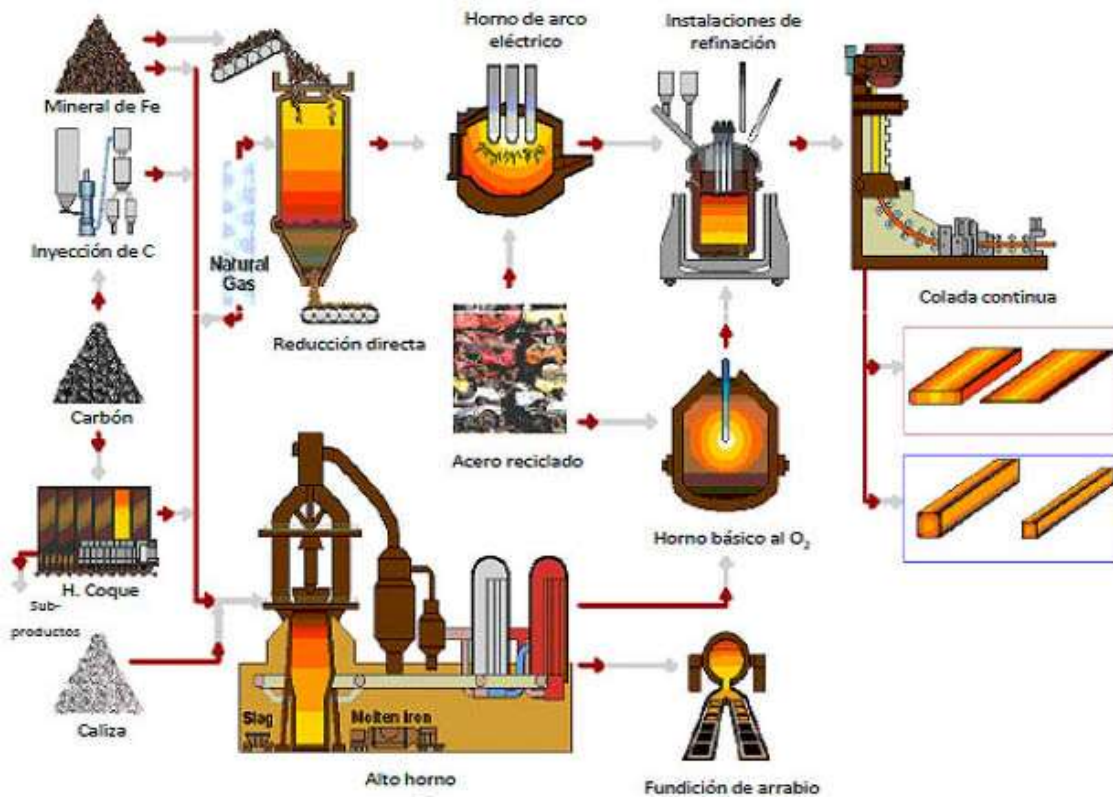


Figura 1.3.1 Esquema general para la producción de acero [4]

#### 1.4 Refinación Secundaria

Se define a la metalurgia secundaria o refinación secundaria como cualquier proceso antecesor a la colada del acero que se lleva a cabo en una estación separada al horno donde se llevó a cabo la fusión.

Los propósitos de la refinación secundaria son: homogeneización o ajuste de la temperatura del baño líquido; el ajuste del contenido de azufre y oxígeno, así como ajuste de otros elementos de aleación; el control de inclusiones; desgasificación, etc.

Estos procesos se desarrollan en diferentes equipos y bajo diferentes condiciones de operación: a presión atmosférica o bajo vacío; con o sin calentamiento, mediante la adición de sólidos o inyección de gas, y en presencia de agitación, ya que la mayoría de procesos de refinación requieren activar mecanismos convectivos de transporte de masa y



destacan por su naturaleza los intercambios metal-escoria (desoxidación y desulfuración) así como las uniformidades térmicas y químicas. La finalidad de esta refinación es incrementar la calidad del acero que se produce.

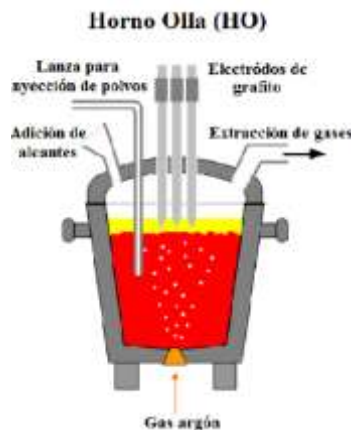
## 1.5 Horno olla

Uno de los equipos donde se realiza la refinación secundaria del acero es el horno olla (ver Figura 1.5.1). Este tipo de reactor usa electrodos de carbono grafito que se utilizan para generar arcos eléctricos que se activan para el aumento y mantenimiento de la temperatura del baño de acero, colocados en una tapa con forma semiesférica, es un contenedor cilíndrico que posee tapones porosos en la parte inferior del mismo para la inserción de gas con el objeto de promover agitación.

Una vez que se ha producido acero en el BOF o en el HEA, se traslada a un horno olla (HO), el cual tiene la función de mitigar la carga del horno de fusión primaria y llevar a cabo operaciones de refinación secundaria.

Entre sus principales funciones se encuentran:

- El ajuste de temperatura del baño de acero líquido implementando energía eléctrica a través de electrodos de grafito.
- La homogeneización de la temperatura y composición química mediante la inyección de gas inerte, que promueve la recirculación del baño en la olla.
- La generación una capa de escoria que protege al refractario del daño por arco, concentra y transfiere el calor al baño de acero, retiene inclusiones y óxidos metálicos y que proporciona los medios para la desulfuración mediante la adición de Ca. [5]



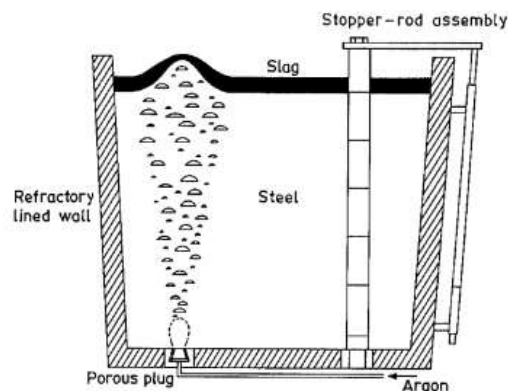
**Figura 1.5.1.** Esquema Horno Olla Contemporáneo[6]

## 1.6 Estudios en ollas agitadas con gas

Dada su complejidad en operación de este tipo de reactores, es muy complejo realizar experimentación en planta, por lo que las herramientas usadas son el modelado matemático y físico, así que en las últimas décadas los estudios en ollas agitadas se han agrupado en tres categorías para su análisis: estudios en modelado matemático, estudios combinados de modelado físico y matemático y estudios en modelado físico, siendo estos últimos de particular interés para el desarrollo de este trabajo.

De acuerdo a lo reportado en la recopilación de Mazumbar y Guthrie[7] en 1995, la relevancia de los estudios en modelado físico se centraba en describir la dinámica de fluido en ollas agitadas, se describe a profundidad el efecto de la incidencia de gas inerte en el baño metálico, el cual induciendo una corriente recirculatoria turbulenta promovía así la homogenización térmica y química en el baño, así como la remoción de inclusiones no metálicas en la escoria.

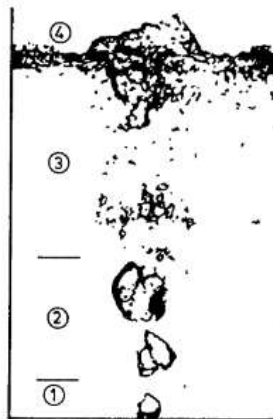
Los fenómenos físicos involucrados en este tipo de equipo como se muestra en la Figura 1.6.1 son diversos, la naturaleza multifásica del sistema baño líquido-escoria-gas; los fenómenos de transporte involucrados, las interacciones líquido-gas, el desarrollo de la pluma inducida por el movimiento recirculatorio en el fluido, la transferencia de masa entre la escoria y el metal líquido, entre otros. Debido a las altas temperaturas, la opacidad del acero líquido y la magnitud de los reactores usados a nivel industrial las mediciones *in situ* se descartaron para el estudio de este tipo de reactores.



**Figura 1.6.1** Esquema de una olla agitada con gas (1995)

Tomando en cuenta que las viscosidades cinemáticas del agua y el acero son equivalentes, se propone entonces la implementación de modelos físicos con agua para estudiar la dinámica de fluidos presente en el proceso. Los estudios se centraron entonces en la descripción de la dinámica del fluido, el tiempo de mezclado y la transferencia de masa.

Para la *dinámica de los fluidos* se expone la descripción de la zona gas-líquido, la cual se subdividió en cuatro zonas: (1) burbuja primaria, (2) burbuja libre, (3) pluma y (4) *pico* tal como se ilustra en la Figura 1.6.2. De estas zonas, la pluma es la que ocupa la mayor proporción en el baño, la cual está caracterizada por pequeñas burbujas esféricas desarrolladas en el sistema. Ante tal descripción se consideró que durante la refinación de acero tanto la energía cinética del gas inyectado, así como el modo de inyección del mismo serían variables relevantes en el sistema.



**Figura 1.6.2** Características de la pluma durante la inyección de gas en un contenedor cilíndrico en un sistema aire-agua.

Las características físicas de la pluma en la zona líquido-gas fueron extensamente estudiadas dada su trascendencia en el sistema. La fracción de volumen de gas, *-frecuencia de burbuja-* y la velocidad de ascenso de las burbujas fueron medidas en numerosas investigaciones en contenedores con diversas geometrías, flujos de gas, diámetro de los inyectores y profundidades del baño líquido con pruebas de electroresistividad y técnicas de fotografía fija, proponiendo expresiones cuyo objetivo era describir la tasa de recirculación del fluido.

En estas investigaciones el número de Froude modificado ( $Fr_M$ ) se aplicó en diversos estudios como un número adimensional que representa varios parámetros en sistemas de agitación con gas.

La definición del número de Froude modificado representa una escala de velocidad característica, que en prácticamente todos los estudios se

consideró sinónimo de la velocidad del gas en el espacio libre a través del orificio de inyección. [8]

Omitiendo los parámetros encontrados para la zona de la pluma, los flujos de líquido inducidos por la inyección del gas fueron medidos y reportados por varios investigadores. Para este propósito técnicas como la velocimetría láser Doppler, pruebas con grabaciones en video y el uso de medidores de flujo electromagnético, fueron utilizadas para efectuar los ensayos. [9]

En contraste con la cantidad de estudios realizados en la zona líquido-gas, el modelado físico de la hidrodinámica que representan la interacción gas-metal-escoria son limitados hasta la publicación citada.

Para este tipo de modelos Tanaka y Guthrie [10] auxiliados con la técnica de Velocimetría Láser Doppler encontraron que, a cualquier flujo de gas, la energía cinética y los movimientos fluctuantes disminuían considerablemente con la presencia de la fase boyante superior, con sus observaciones se propusieron nuevos arreglos experimentales para cuantificar este fenómeno en función del espesor de la capa de escoria, su viscosidad y densidad.

Una de las principales funciones de las ollas agitadas de acero es el mezclado tanto de especies químicas como de temperatura, por lo que resultó de particular interés en esa década la eficiencia de las *operaciones de mezclado*, sin embargo, éstas se centraron en mezclado químico.

El tiempo de mezclado ( $\tau_M$ ) se utilizó para representar el estado de agitación -que puede traducirse en eficiencia- en los sistemas. Las investigaciones se centraron en cuantificar, experimentalmente, el tiempo de mezclado en función de las variables de operación como el flujo de gas, la geometría de los modelos, la configuración de los inyectores, etc. empleando modelos a escala con agua. Las técnicas más utilizadas para los estudios de mezclado fueron mediciones basadas en pH o conductividad eléctrica.

En resumen, de estos estudios se propusieron varias correlaciones de tiempo de mezclado, en las que en su mayoría son función de la tasa de entrada de energía potencial ( $\varepsilon_m$ ) la cual comprende el trabajo realizado por las burbujas ascendentes de gas. Las diferencias en estas expresiones se justifican dadas las disposiciones experimentales de los investigadores, así como en los criterios de mezclado empleados. Algunos demostraron que el estado de mezclado en sistemas de agua agitados con gas bajo un conjunto de condiciones de operación son función del sitio de inyección del trazador, así como del punto de monitoreo.[11]

Las reacciones químicas entre el gas de inyección y el fluido, así como las relacionadas entre los dos líquidos inmiscibles (escoria-metal) en ollas agitadas con gas, también fueron de particular interés para los ingenieros metalúrgicos. Para simular las reacciones químicas entre las burbujas de gas y el líquido, fueron empleados modelos acuosos, empleando  $\text{CO}_2$  para la fase gaseosa y  $\text{NaOH}$  para la fase líquida, se encontró que los tapones porosos producen burbujas relativamente más pequeñas, distribuidas uniformemente y de menor tamaño, lo que conlleva a un aumento en el área interfacial efectiva y, por lo tanto, un aumento de la transferencia de masa en las interacciones líquido-gas, en comparación con la inyección con lanzas.[12]

Por su parte Kim y Fruehan[13], así como Taniguchi[14], encontraron que la fase de escoria es un auxiliar para minimizar la absorción de gas en el líquido en comparación con el fluido sin ningún tipo de cubierta.

Los modelos físicos de agua también fueron empleados para los fenómenos de transferencia de masa entre la escoria y el metal en ollas agitadas con gas. En ellos, fluidos orgánicos como aceite, benceno, ciclohexano, etc. fueron utilizados para representar la fase de escoria. La visualización de los flujos fue reportada en diversos estudios, en ellos se destaca que en la interfase aceite-agua se presentan ciertas perturbaciones y, consecuentemente, se producirían una serie de fenómenos físicos complejos, como la excesiva deformación de la interfase, la formación de ligamentos de aceite, la generación y arrastre de gotas, etc. tal como se observa en la Figura 1.6.3, los cuales se presentaron al incrementar el flujo de gas en el sistema, ya que a flujos relativamente bajos la interfase permanecía imperturbable.

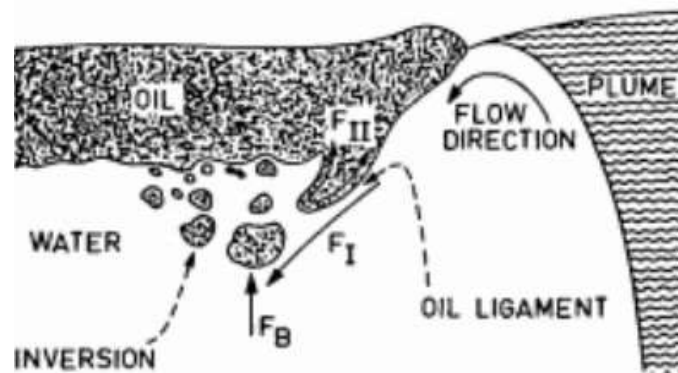


Figura 1.6.3 Esquema que representa las interacciones entre la pluma y las fases de los líquidos inmiscibles

Los estudios combinados de modelado físico y matemático se enfocaron en dos tópicos principales: el estudio de la hidrodinámica y el transporte de calor y masa en el sistema.

En un inicio las simulaciones numéricas para el estudio de la *hidrodinámica* en ollas sistemas con flujo turbulento, emplearon las ecuaciones de Navier Stokes en conjunto con el modelo de turbulencia K- $\epsilon$  (Epsilon). Szekely y Debroy[15] fueron los precursores de este tipo de investigaciones en ollas agitadas con gas, sus mediciones fueron asistidas –en su mayoría- experimentalmente con la técnica de velocimetría Láser Dópler, sin embargo, los parámetros de turbulencia encontrados (componentes de estrés de Reynolds ( $Re$ ), componentes de la velocidad fluctuante, etc.), fueron poco satisfactorios al compararlos con los resultados experimentales, por lo que este modelo de turbulencia se consideró inadecuado para simular realísticamente los fenómenos de turbulencia en ollas agitadas con gas. Por lo que los estudios subsecuentes se centraron en el empleo de otros modelos que mostraran una mejor correlación con los resultados experimentales, como se menciona el caso de Sahai y Guthrie[16] los cuales propusieron un modelo macroscópico para predecir la velocidad de ascenso de la pluma y un promedio de la velocidad de recirculación del líquido en función de las variables de operación; por su parte Johansen y Boysan[17], emplearon una aproximación computacional combinada de dos fases Lagrangiano-Euleriano, con el cual predijeron la distribución de la fracción de volumen de gas, la velocidad del líquido, y la turbulencia del fluido en sistemas axisimétricos de agitación con burbujeo.

Mientras que el estudio de fenómenos de transporte de masa y calor, se centró en el tiempo de mezclado, las reacciones entre escoria-metal, la fusión y disolución de líquidos, etc.

Las investigaciones que conciernen al modelado matemático, de igual forma que en las otras categorías citadas en el artículo de referencia, se centraron en el estudio de la hidrodinámica, la transferencia de masa y calor, así como los fenómenos de turbulencia implicados en el sistema. En ellos se emplearon tres aproximaciones: (i) la formulación monofásica de densidad variable, (ii) combinada de dos fases Lagrangiano-Euleriano y (iii) el Euleriano de dos fases. En todas las aproximaciones parámetros empíricos como el tamaño de burbuja, las dimensiones de la pluma, coeficientes de arrastre necesitaban ser especificados.

Casi una década después, en 2004, Mazumdar y J.W. Evans[18] se centraron en la recopilación de estudios macroscópicos en ollas agitadas

con gas, en los que predominaron modelos simples, pero efectivos en términos de parámetros de operación claves (dimensiones de la olla, flujos de gas, dimensiones de los inyectores, etc.) los cuales son críticos para el análisis de este tipo de sistemas.

En resumen, se obtuvieron correlaciones para explicar los diferentes fenómenos referentes a las ollas agitadas: la hidrodinámica, el mezclado, la fusión y disolución de sólidos, el modelado físico y su escalamiento, así como la estructura de la pluma, siendo estos últimos dos de particular interés dada la información limitada que se tenía hasta entonces.

Se obtiene la representación más realística de la hidrodinámica del sistema ver Figura 1.6.4, donde se muestran grandes burbujas esféricas distribuidas escasamente dentro de una mezcla ascendente de acero líquido y gas argón. El diagrama, a pesar de ser sencillo, sugiere una superficie de flujos de líquido que se elevan hacia las paredes del reactor, con un flujo horizontal inverso hacia la pluma ascendente, el cual también posee la característica de ser un sistema axi-simétrico.

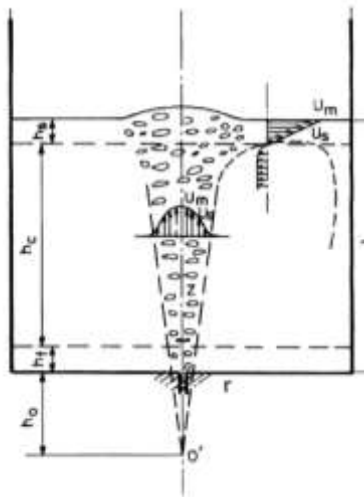


Figura 1.6.4 Esquema de olla agitada con gas que ilustra los diferentes fenómenos hidrodinámicos presentes.

En un trabajo individual Mazumdar[19] agregó una definición del Número de Froude exclusivo para flujos en ollas agitadas Ecuación (1):

$$N_{FrL} = \frac{U_p^2}{gL} \dots \dots \dots (1)$$

E incorporando la expresión apropiada para la velocidad de la pluma Ecuación (2), al número antes mencionado

$$U_p = 3.1 \frac{Q^{0.33} L^{0.25}}{R^{0.58}} \dots\dots\dots(2)$$

donde  $U_p$  es la velocidad de la pluma,  $Q$  es el flujo de gas,  $R$  y  $L$  son el radio y la altura de la olla.

Se obtuvo una relación entre el modelo ( $m$ ) y la olla a escala real ( $fs$ ) a través de la Ecuación (3), donde los flujos de gas se expresaron únicamente en términos de un factor de escala geométrico,  $\lambda$  como:

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_{f.s} \dots\dots\dots(3)$$

Posteriormente tras un gran número de mediciones en el tiempo de mezclado[20] en tres modelos de agua de geometría similar, pero de diferentes tamaños, se confirmó que la relación entre los tiempos de mezclado varía en proporción ( $\lambda^{0.5}$ ), provistos por flujos de gas entre los sistemas por la relación encontrada en la Ecuación (3). Estos estudios confirmaron entonces que el escalamiento provisto por la ecuación antes citada, es esencialmente un reflejo de similitud dinámica entre dos sistemas geoméricamente similares de agitación por gas isotérmicos.

Los estudios no-isotérmicos en ollas agitadas con gas eran limitados, hasta que Pan y Bjorkman[21] propusieron a partir de ecuaciones gobernantes de flujo y energía térmica, en conjunto con el criterio de similitud dinámica, una relación adicional, que se presenta en la Ecuación (4) , y que pudiese escalar la temperatura de operación en el modelo y la de del sistema a escala real, donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica:

$$(\beta\Delta T)_{modelo} = (\beta\Delta T)_{escala\ real} \dots\dots\dots(4)$$

Los mismos autores realizaron un balance macroscópico de energía demostrando que la proporción del flux de calor superficial entre los modelos acuosos y las ollas agitadas de acero debe variar en una proporción ( $0.283\lambda^{0.5}$ ) para que la similitud térmica se mantenga. Sin embargo, es señalado por los autores de este artículo que sus criterios son únicamente aplicables para condiciones de convección natural, por lo que se dificulta la reproducción experimental en modelos donde se inyecta gas, es decir, con convección forzada y en modelos de acrílico donde la transferencia de calor extraída por las paredes se minimiza.



En este mismo periodo se asignan nuevos alcances a las investigaciones de modelado físico con la fase de escoria, se centran en el estudio del área expuesta por la pluma ya que es un parámetro de gran relevancia desde el punto de vista del fenómeno de re-oxidación y consecuentemente la limpieza del acero, así como en la pérdida de energía por radiación. Yonezawa y Schwerdtfeger[22], emplearon una técnica video/fotográfica donde medían el área expuesta por la pluma en función de los flujos de gas, las dimensiones de los inyectores de gas y el espesor de la capa de escoria en dos diferentes sistemas agitados con gas: un modelo de mercurio-aceite de silicón y un modelo a escala de 350 toneladas de una olla agitada con argón.

En el año 2017 el investigador Ahindra Ghosh[23] publicó una recopilación de sus estudios en ollas agitadas con gas, el cual realizó para la empresa privada Tata Steel ®, su trabajo se fraccionó en tres fases: la fase uno consistió en el modelado del flujo en las ollas y el modelado térmico, los resultados para la descripción del flujo en la olla fueron invariantes respecto a la información proporcionada por Mazumdar y Evans en 2004, sin embargo, este investigador realizó aportaciones significativas en cuanto a la descripción de transferencia de calor en el horno olla, consideró el aporte de calor proporcionado por las reacciones químicas que se dan entre el baño líquido y las adiciones tanto de aluminio como de ferromanganeso, señaló algunos parámetros del proceso tales como las propiedades del material refractario y el pre-calentamiento de la olla como variables significantes en la pérdida de calor del baño de acero líquido al refractario, las pérdidas de calor por convección natural entre las paredes exteriores de la olla y el ambiente, las pérdidas generadas por radiación, etc. La fase dos se centró en el desarrollo de un modelo estadístico para la predicción y control de la temperatura y composición química en la olla el cual se basó en la simplificación física del modelado térmico, un modelo químico basado en un balance de materia y una extensiva colección de datos de la planta, en tanto la fase tres únicamente se enfocó en las modificaciones del modelo estadístico para un óptimo funcionamiento de este tipo de reactores.

### **1.7 Fluorescencia Planar Inducida por Láser**

Teniendo como antecedentes los estudios en ollas agitadas realizadas a lo largo de los años, la técnica de PLIF térmico resulta innovadora por su carácter no intrusivo en este tipo de reactores. La misma fue rectificada

en un trabajo alterno realizado por el mismo equipo de investigación por Ana Gómez en el cual se utilizó un modelo físico de una olla a escala 1/17, las mediciones obtenidas por la técnica fueron comparadas con mediciones registradas por termopares tipo K, mostrando resultados satisfactorios para la investigación en ollas agitadas con gas. [24]

La fluorescencia planar inducida por láser (PLIF) es una técnica óptica de medición utilizada para medir campos de concentración o mapas de temperatura en flujos líquidos. Las aplicaciones de esta técnica engloban diversas áreas de investigación en dinámica de fluidos (operaciones de mezclado en sistemas con agitación, sistemas de calentamiento y enfriamiento, etc.).

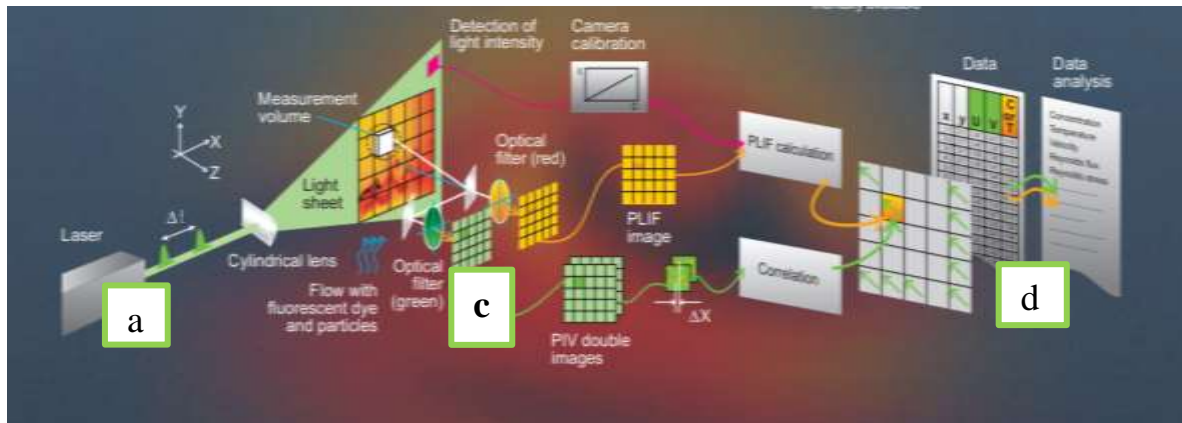
Entre las características más representativas de la técnica PLIF se encuentran:

- Su naturaleza no intrusiva.
- Proporcionar mediciones cuantitativas precisas de campos de concentración o temperatura.
- En combinación con mediciones de velocidad, propiedades de transporte pueden ser deducidos experimentalmente (por ejemplo, coeficientes de difusión turbulenta).

El equipo básico para llevar a cabo mediciones con esta técnica es:

- a) Una fuente láser con la óptica adecuada para formar una delgada lámina de luz.
- b) Un trazador fluorescente que marca el fluido y el cual es monitoreado durante las mediciones. En mediciones de temperatura el trazador es mezclado con el fluido previamente y el nivel de fluorescencia remitido varía con la temperatura local. Estos compuestos absorben la energía de la luz proveniente del láser y remiten la luz en una longitud de onda más amplia que puede ser detectada por un fotodetector. Los trazadores usados comúnmente en líquidos son Rodamina 6G (para mediciones de concentración), Rodamina B (para mediciones de temperatura) y Fluoresceína Disódica (para mediciones de concentración y temperatura).
- c) Una cámara equipada con un filtro especial, de modo que sólo se graba la luz fluorescente.
- d) Ordenador para análisis de datos. [25]

La disposición de este equipo se ilustra en la Figura 1.7.1



**Figura 1.7.1.** Configuración del equipo utilizado en la técnica PLIF

En este trabajo se usa la técnica PLIF térmica para evaluar el mezclado térmico en modelos físicos de ollas agitadas con gas en función del flujo de gas, posición y número de tapones.

## 1.8 Hipótesis

Las condiciones de operación que promuevan un mezclado térmico óptimo no necesariamente serán las mismas que las que promueven un mezclado químico óptimo.

## 1.9 Objetivos

### Objetivo general

- Estudiar el efecto del flujo de gas, número y posición de las toberas de inyección de gas, sobre el mezclado térmico en modelos físicos de ollas agitadas con gas, usando la técnica novedosa PLIF térmico.

### Objetivos particulares

- Realizar experimentos en un modelo físico, el cual consiste de una estructura metálica como soporte de tres quemadores de gas butano/propano, como fuentes de energía que simulen arcos eléctricos que mantienen caliente al acero líquido, evaluando su desempeño para simular sistemas de ollas agitadas con gas no isotérmicos.
- Establecer la similitud térmica adecuada en el caso del mezclado térmico para poder extrapolar los resultados del modelo físico al prototipo.

- Evaluar el efecto del flujo de gas, posición y número de inyectores de gas sobre el mezclado térmico, a través de un diseño de experimentos factorial completo y su posterior análisis estadístico de resultados.
- Proponer condiciones óptimas del flujo de gas, posición y número de inyectores de gas que maximicen el mezclado térmico.

## 2. Metodología de trabajo

### 2.1 Modelo físico

Se define a un modelo físico como una representación aproximada de un sistema o proceso empleando materiales alternos a los que se encuentran en los sistemas reales con la finalidad de facilitar su estudio en diversos campos de interés.

Para el caso de la olla agitada de acero se empleó un modelo a escala 1:6 fabricado de polimetilmetacrilato (PMMA), el cual básicamente posee forma cilíndrica y está rodeado por una chaqueta conformada por un prisma rectangular de 57x57x64.5 cm para eliminar las aberraciones ópticas, para el estudio del efecto del número y posición de los inyectores, el modelo posee 5 tapones para la inserción de aire, los cuales se localizan: (1) en el centro del modelo y de manera equidistante (2) a  $1/3$  y (2)  $4/5$  del radio interno del modelo, alineados horizontalmente. En la Figura 2.1.1 se presenta el modelo físico donde se ilustra la disposición de tapones.

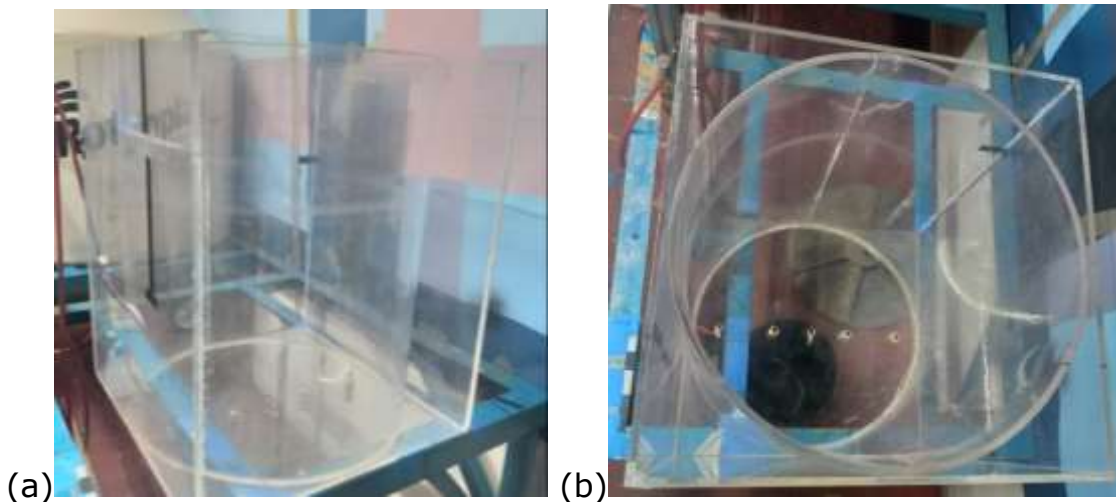


Figura 2.1.1 Modelo físico y configuración de los tapones de inserción de aire (a)vista lateral, (b)vista superior.

Este modelo describe un horno olla con capacidad de 140 toneladas que emplea la empresa TENARIS TAMSA. Las dimensiones significativas tanto del modelo como de la olla real, así como el escalamiento del flujo de gas con la ecuación (3) se enlistan en la Tabla 2.1.1 [26].

Tabla 2.1.1 Dimensiones físicas del modelo a escala real y modelo físico.

	Altura de la olla (m)	Diámetro Interno D (m)	Profundidad del baño líquido en la olla, H (m)	Rangos de flujo de gas Q (m <sup>3</sup> /min)	Volumen de la olla (m <sup>3</sup> )
Modelo a escala real	3.736	3.226	2.460	0.2-0.6	22.89
Modelo físico	0.622	0.528	0.410	0.0135-0.0405	0.1059

El trazador empleado fue una disolución de rodamina B a 200 ppm. La rodamina B (C<sub>28</sub>H<sub>30</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,HCl) es un compuesto orgánico (ver Figura 2.1.1) que se caracteriza por ser un pigmento fluorescente sensible a los cambios de temperatura, a bajas temperaturas éste compuesto absorbe y emite mayor cantidad de luz, mientras que a altas temperatura esta intensidad de absorción disminuye y se torna más opaco, además posee una buena solubilidad en agua, lo cual resulta favorable para el arreglo experimental, en la Tabla 2.1.2 se anexan algunas propiedades de este compuesto.

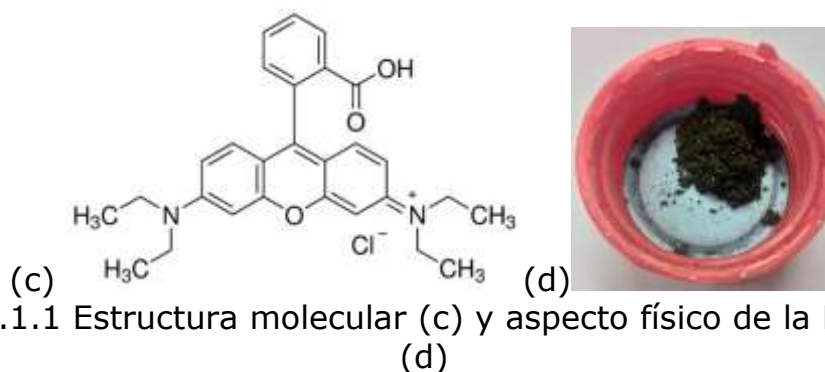


Tabla 2.1.2 Propiedades físicas de la Rodamina B [27]

Peso molecular (g/mol)	Pureza	Solubilidad en agua (mg/mL)
479.01	≥95%	1

Debido a que se estudia un sistema de calentamiento fueron empleados tanques de gas butano/propano marca LinmexGas® de 275 g conectados a un sistema de soporte que simula los electrodos de grafito y el arco eléctrico que genera el calor en este tipo de reactor, éstos fueron colocados a 120° uno de otro formando un triángulo equilátero o "delta", el soporte se situó en el centro del modelo y se alineó a una distancia de 1/3 del radio interno, la distancia entre los quemadores y la solución se delimitó a 15 cm con el propósito de evitar el ahogo de los mismos durante el burbujeo. El gasto promedio de combustible durante los experimentos fue de  $219.22 \pm 12.52$  g. La disposición de este artefacto se ilustra en la Figura 2.2.2.

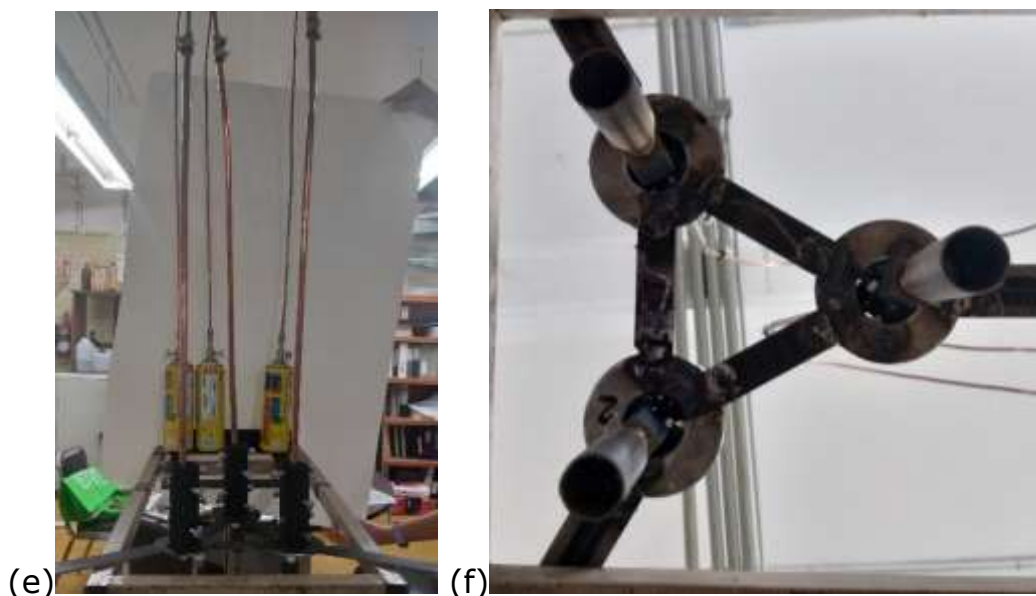


Figura 2.2.2 (e) Soporte de quemadores (f) vista inferior de los quemadores.

Para simular el gas argón que se inyecta en las ollas, se empleó un compresor de aire marca Coleman®, modelo Powermate Premium™. Mientras que el flujo de aire era regulado por dos flujómetros marca Cole Parmer®, modelo PMR-010366™.

## 2.2 Criterios de similitud

Para rectificar que el modelo cumpla su función de representar al sistema real es necesario que el mismo cumpla con ciertos criterios de similitud

los cuales se enuncian a detalle en esta sección, los empleados en este trabajo fueron criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

La similitud geométrica puede expresarse como un factor de escala ( $\lambda$ ), el cual se define como la relación entre cualquier longitud del modelo físico entre la longitud del modelo a escala real:

$$\lambda = \frac{\lambda_{modelo}}{\lambda_{real}} \dots \dots \dots (5)$$

Para el caso específico lambda es igual a 1/6. Las medidas tanto del modelo a escala como de la olla real fueron enunciadas en la sección anterior en la Tabla 2.1.1.

El criterio de similitud cinemática se fundamenta en las propiedades de los fluidos que se analizan en los sistemas de estudio; para el caso de la olla industrial el empleo de acero fundido, mientras que para el caso del modelo físico el empleo de agua a temperatura ambiente, ambos líquidos poseen viscosidades cinemáticas equivalentes por lo que se puede asumir que las magnitudes de las velocidades entre uno y otro son similares. En la Tabla 2.2.1 se expresan las propiedades físicas de dichos fluidos.

Tabla 2.2.1 Propiedades físicas del agua y acero.

Fluido	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$V$ (m <sup>2</sup> /s)	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )
Agua (20°C)	1000	1.00x10 <sup>-6</sup>	0.001
Acero (1600°C)	7000	0.97x10 <sup>-6</sup>	0.006

La similitud dinámica se establece a raíz del trabajo de Mazumdar citado anteriormente [19] en el que empleando el Número de Froude (el cual relaciona fuerzas inerciales y gravitacionales) en conjunto con una expresión apropiada para la velocidad de la pluma, relacionó los flujos de gas  $Q$  entre el sistema real y el modelo físico únicamente utilizando el factor de escala ( $\lambda$ ):

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_{f.s} \dots \dots \dots (3)$$

### **2.3 Disposición experimental y descripción del procedimiento para la medición de temperaturas empleando la técnica PLIF en un modelo físico de ollas agitadas con gas.**

Lo que se presenta en esta sección es la descripción paso a paso de una metodología robusta después de todas las mejoras hechas a la técnica, la cual nunca se había reportado anteriormente en la literatura para el



estudio de ollas agitadas con gas en condiciones no isotérmicas. En el Apéndice A se presenta una descripción completa de solución de inconvenientes hasta llegar a una técnica robusta para beneficio de lectores que deseen implementar por vez primera esta técnica. El procedimiento para realizar mediciones con esta técnica puede dividirse en las siguientes etapas: (I) la preparación de la disposición del equipo y el trazador, (II) la calibración de temperatura, (III) el desarrollo del experimento y (IV) el tratamiento de los datos, los cuales se detallan a continuación.

(I) Preparación de la disposición del equipo y el trazador.

Al tratarse de la técnica de PLIF térmico, el trazador debe estar presente en la disolución desde el inicio de la experimentación, para prepararla se disolvió 0.024g de Rodamina B en un litro de agua destilada. A partir de esta disolución se tomaron 12 mL para preparar 20L de disolución a una concentración de 200 mg/L que equivalen a 200 ppb. Lo anterior se estipuló a raíz de los experimentos realizados por Ana Gomez[24] donde se validó la técnica, mostrando resultados adecuados en la obtención de señal a dicha concentración.

La capacidad del modelo es de aproximadamente 80 L por lo que debe tomarse en cuenta la disposición de un contenedor lo suficientemente grande para su almacenamiento, lo anterior con la finalidad de mantenerla lo más homogénea posible considerando que se debe renovar entre calibración y el experimento con su réplica, sumando un total de 240 L de trazador para su empleo.

El modelo se coloca en una superficie plana, con marcas delimitadas para asegurar siempre la misma posición del mismo, para posteriormente llenarlo a la altura correspondiente: en la sección cilíndrica se coloca el trazador hasta una altura de 41 cm, mientras que en la chaqueta se coloca agua destilada a 48 cm de altura con la finalidad de evitar distorsiones ópticas causadas por la curvatura cilíndrica. Lo anterior se refleja en la Figura 2.3.2

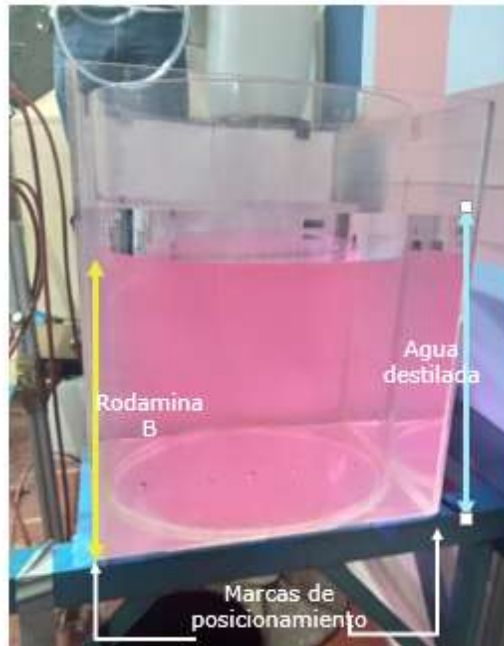


Figura 2.3.2 Colocación y llenado del modelo físico

El láser empleado es DPSS marca MEGALUZ®, modelo LA014™ con una potencia de 20W y una longitud de onda de 532 nm(verde), el cual tiene como accesorio una lente cilíndrica de 5x11mm que proporciona una hoja de luz láser homogénea ver Figura 2.3.3.



Figura 2.3.3 Lente cilíndrica 5x11 situada en el láser

El láser se ajusta de acuerdo al plano de medición que se seleccione mediante un controlador marca ALIENPRO®, modelo DMX192CH™ y está situado perpendicularmente a 53 cm del modelo. La configuración del controlador se establece en los controles de Scanners y Scenes en el botón 1 para proporcionar la línea vertical de luz verde.

El modelo además se posicionó de manera en la que el plano de medición sea paralelo a los inyectores y a la cámara. En el presente trabajo se seleccionó el plano de medición de  $R/2$  para la medición de temperaturas, lo anterior se refleja con claridad en la Figura 2.3.3.

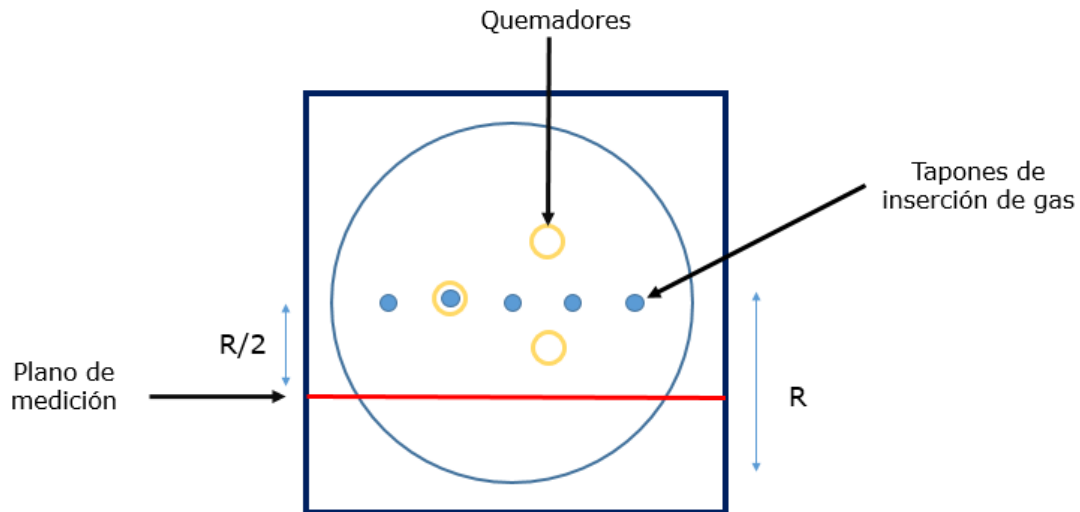


Figura 2.3.3 Localización del plano de medición vista superior

Tanto durante el desarrollo de los experimentos como en la calibración de la temperatura en el modelo, es indispensable generar una sombra o máscara que evite los reflejos generados en la superficie del modelo debido al burbujeo, ya que al ser una técnica sensible a la propagación de la luz los resultados se verían alterados por los reflejos antes mencionados debido a que son ajenos al brillo proporcionado por el trazador. Lo anterior se logró colocando una banda vertical negra en el plano de medición a una altura de 31 cm hasta la altura de la disolución -41 cm-. En la Figura 2.2.4 se distinguen tanto la sombra en el modelo como la banda que la genera.

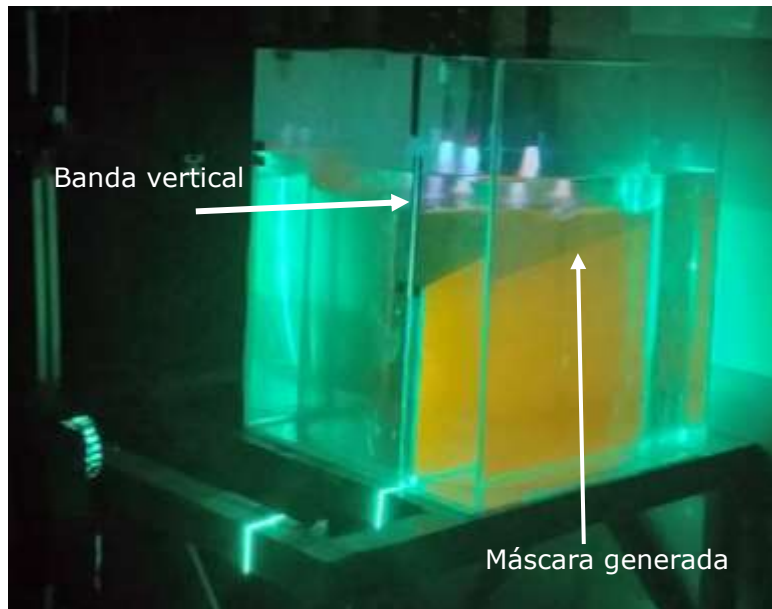


Figura 2.3.4 Máscara generada para evitar los reflejos de la superficie producidos por el burbujeo

La cámara utilizada para la captura de video durante las etapas de calibración y experimentación es de la marca Canon®, modelo EOS Rebel; posee una resolución de 1920x1280 pixeles. La cámara se sitúa a 84 cm del modelo físico mediante un soporte automático, en el lente de la misma se acopla un filtro óptico de 570 nm especial para la técnica de PLIF, ambos proporcionados por Dantec Dynamics®.

## (II) Calibración de la temperatura

Una vez que se tiene la disposición adecuada del equipo, se procede a realizar la calibración. Esta etapa se realiza antes de cada experimento y es indispensable al tratarse de una técnica no intrusiva y que basa su funcionamiento en la intensidad de brillo generado por una temperatura. Para desarrollar la calibración se selecciona un rango de temperatura apropiado que abarque toda posible medición de temperatura durante el experimento, para el caso particular se trabajó desde 20°C hasta 40°C. La temperatura se incrementaba sucesivamente 5°C mediante resistencias eléctricas, posteriormente éstas eran retiradas y se registraba en videos la imagen del baño durante 3 segundos para su posterior análisis computacional donde se correlaciona el brillo o fluorescencia del líquido con su temperatura. En la Figura 2.4.5 se ilustra el calentamiento de la disolución durante la calibración con las resistencias eléctricas. Para una descripción completa del proceso de calibración, se puede consultar el trabajo de Jardón y colaboradores [33].



### 2.3.5 Calentamiento de la disolución durante la calibración

#### (III) Desarrollo del experimento

Posterior a la calibración, se retiró la solución caliente del modelo y se reemplazó con solución que se encuentra a temperatura ambiente.

En primera instancia se acondicionaron los quemadores hasta alcanzar una flama estable. Para ello se mantenían encendidos durante un periodo de 5 minutos, previos a su posicionamiento en el modelo, lo anterior se realizaba con la finalidad de garantizar una operación continua de los mismos una vez que se iniciaba el experimento, esta operación de precalentamiento se realizaba con latas de gas exclusivas para esta función las cuales eran reemplazadas a la brevedad con latas nuevas para iniciar el experimento, de tal manera que cada experimento comience con latas nuevas para asegurar reproducibilidad y disminuir errores experimentales.

A la par de esto se ajusta el flujo, el número de tapones y la posición de los mismos de acuerdo a la matriz experimental. Se registra la temperatura inicial con un termómetro el cual es retirado inmediatamente una vez que cumple su función.

Posteriormente se coloca el dispositivo con los quemadores y se inicia la grabación del video, teniendo un periodo de permanencia de 20 minutos, verificando constantemente la estabilidad de todo el sistema, especialmente de los quemadores que operan al 100% de válvula abierta. Finalmente se registra la temperatura final del baño con el termómetro. Cada experimento de la matriz se realizó por duplicado.

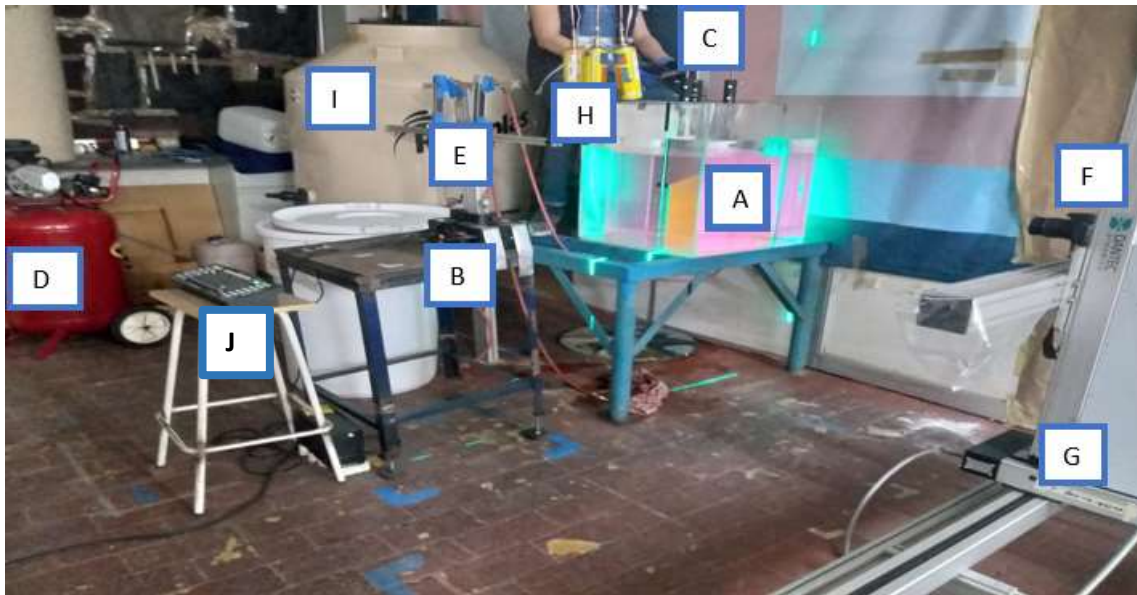


Figura 2.3.6 Configuración del sistema para la implementación de la técnica PLIF térmica en un modelo físico 1/6 de olla agitada con gas.

En la Figura 2.3.6 Se pueden apreciar los diferentes elementos que conforman el sistema experimental del modelo físico. Los cuales se describen a continuación.

- A. Modelo físico 1/6 de una olla agitada con gas.
- B. Fuente láser DPSS.
- C. Quemadores en su arreglo triangular que representa la posición de la delta de electrodos en un horno olla industrial de corriente alterna.
- D. Compresor de aire.
- E. Flujómetros.
- F. Cámara digital acoplada con el lente de la técnica PLIF térmica.
- G. Soporte automático.
- H. Tanques de gas butano/propano.
- I. Tanque de almacenamiento de Rodamina B.
- J. Controlador láser.

#### (IV) Tratamiento de datos

Una vez que se dispone de las filmaciones en video se obtienen imágenes en formato JPG con un software convencional para conversión de videos (Figura 2.3.7). Posteriormente estas imágenes se tratan con el programa XN Convert® en el cual se asegura que todas las imágenes procesadas cuenten con la misma cantidad de píxeles, además de colocar una máscara, la cual se colocó durante la operación del modelo para evitar los reflejos de la superficie causantes de ruido durante el procesado. Las acciones en el programa para enmascarar se muestran en la Figura 2.3.8.



Figura 2.3.7 Conversor de video a imágenes en formato JPG.

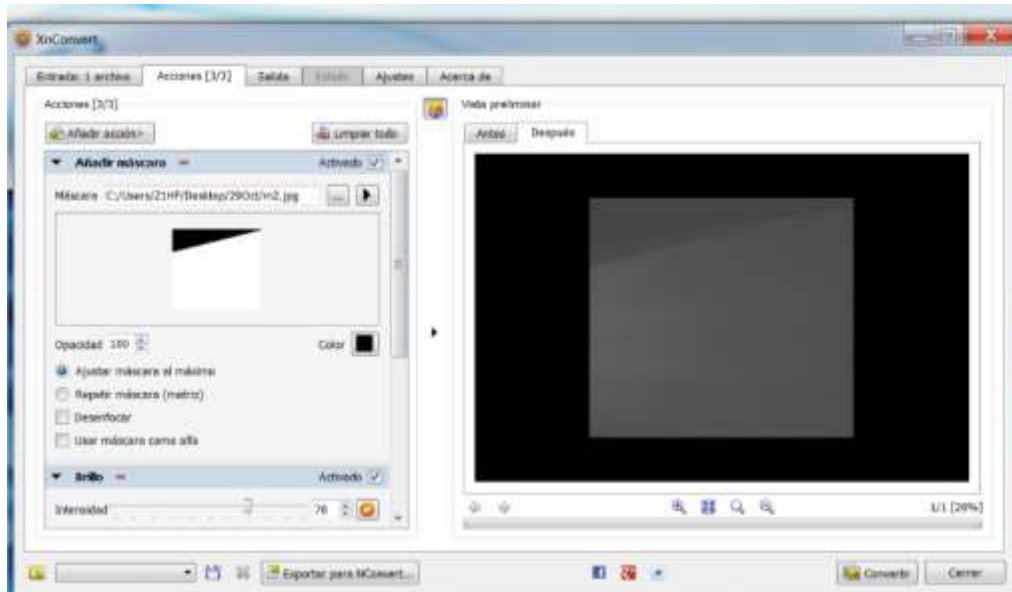


Figura 2.3.8 Tratamiento de imágenes con el programa XN Convert®.

Las imágenes de calibración y experimentación se procesan de manera alterna y de forma consecutiva con dos códigos diferentes en Matlab ®.

## 2.4 Matriz Experimental

Se propuso la siguiente matriz experimental, basada en información previa del mismo grupo de trabajo con un diseño estadístico factorial a dos niveles con el programa Minitab®. En la Tabla 2.4.1 se presentan las variables a analizar en sus niveles alto y bajo. En la Tabla 2.4.2 se presentan los 8 experimentos que resultan de un diseño de experimentos factorial a dos niveles de las tres variables involucradas y recalcar que cada experimento se realizó por triplicado.

Tabla 2.4.1 Variables bajo análisis

Variable	Q	r/R	N
Valor bajo (-)	1 L/min	1/3	1
Valor alto (+)	9 L/min	4/5	2



Tabla 2.4.2 Matriz experimental

	Q	r/R	N
Experimento 1	-	-	-
Experimento 2	+	-	-
Experimento 3	-	+	-
Experimento 4	+	+	-
Experimento 5	-	-	+
Experimento 6	+	-	+
Experimento 7	-	+	+
Experimento 8	+	+	+

### 3. Resultados y discusión

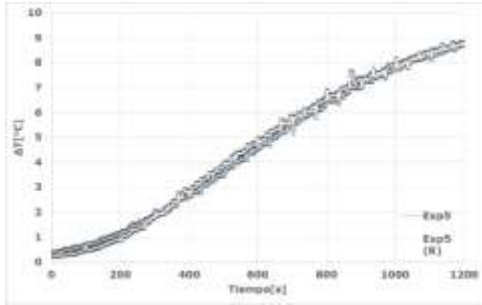
#### 3.1 Resultados de transferencia de calor (PLIF)

Debido a la diferencia de las condiciones iniciales y finales de temperaturas entre los experimentos y sus réplicas debido a las variaciones de temperatura ambiental, se procedió a igualar las mismas restando la temperatura inicial a la temperatura registrada en el tiempo, obteniendo así el  $\Delta T$  cada segundo con la finalidad de producir las curvas de calentamiento de los experimentos efectuados.

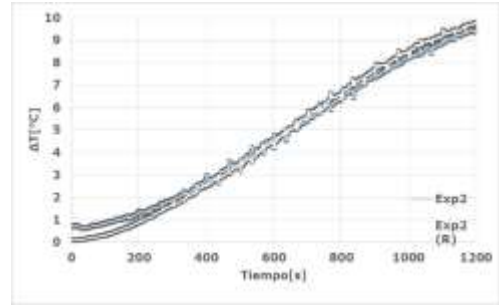
$$\Delta T = T_R - T_i \dots \dots \dots (6)$$

Donde  $T_R$  es la temperatura registrada instantánea en el líquido y  $T_i$  es la temperatura inicial.

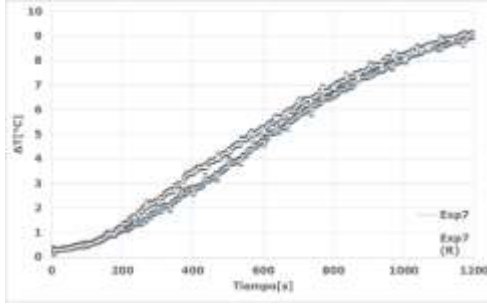
La Figura 3.1.1 muestra las curvas de calentamiento para cada uno de los experimentos de la matriz experimental de la Tabla 2.4.2 y su réplica. Se trata de una curva que describe la temperatura promedio del agua en todo el plano de medición en función del tiempo.



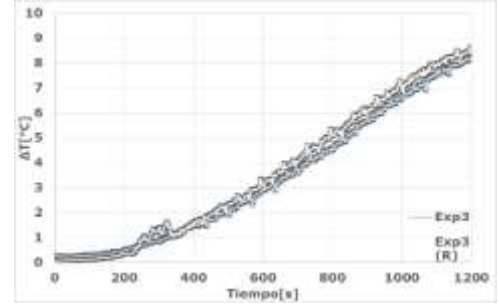
Experimento 1 (a)



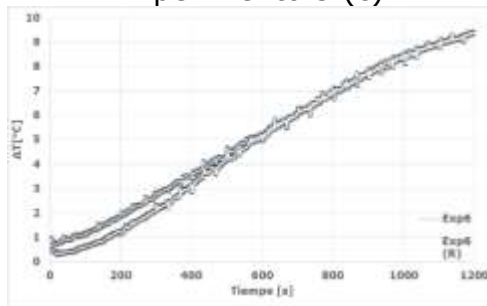
Experimento 2 (b)



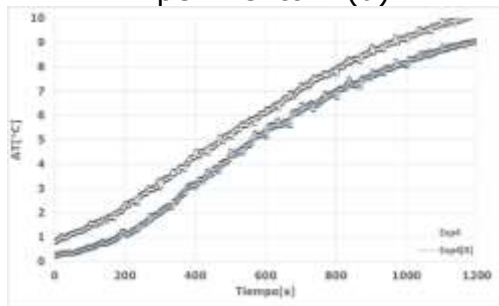
Experimento 3 (c)



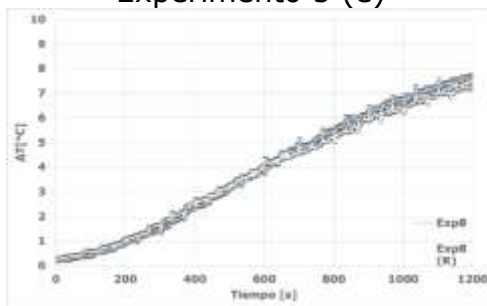
Experimento 4 (d)



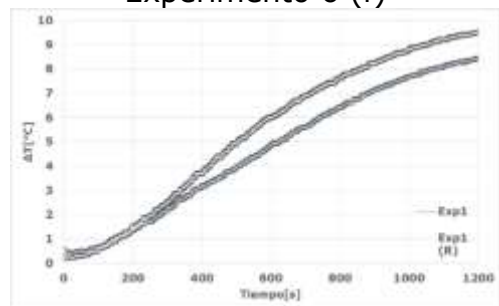
Experimento 5 (e)



Experimento 6 (f)



Experimento 7 (g)



Experimento 8 (h)

Figura 3.1.1. Curvas de calentamiento para cada uno de los experimentos de la matriz experimental y su réplica.

De las curvas de la Figura 3.1.1 se observó que el calentamiento del sistema es variable en el tiempo para cada uno de los experimentos en cuestión, puesto que las pendientes asociadas a cada curva son visiblemente diferentes. Sin embargo, se presenta un patrón en la evolución de cada sistema donde se distinguen tres zonas: en la primera se establece un periodo transitorio del sistema en donde el aporte de calor generado por los quemadores se emplea para equilibrar todo el sistema térmicamente incluidos los alrededores, es decir que se proporcione las condiciones para que las entradas de calor sean iguales a la disipación de las mismas, por lo que en esta etapa se puede afirmar que el aporte de calor al baño de agua es menor y se da principalmente entre los 100 y 200 s, donde la pendiente de cada curva es menor. La segunda zona se caracteriza por un aumento significativo en el  $\Delta T$  respecto al tiempo que se asocia a la estabilidad térmica, en donde el aporte de calor es suministrado de forma constante en todo el baño y se da aproximadamente entre los 200 y 1000 s, mientras que en la última zona se muestra de nuevo un cambio en la pendiente de las curvas, mostrando de nuevo una disminución en la misma la cual se atribuye a que el sistema está tan caliente que las entradas se equilibran con las pérdidas hacia los alrededores, teniendo como consecuencia un incremento cada vez menor de la temperatura del agua. Este comportamiento se presentó generalmente a partir de los 1000 s hasta la conclusión de los experimentos.

Cabe señalar que la desviación estándar presente en las lecturas de temperatura es mínima y de ello se destaca que la dispersión de las mediciones registradas por la técnica PLIF es muy pequeña, ésta se visualiza en las curvas en tonalidades grises, lo que nos indica que el baño presenta una gran uniformidad térmica, es decir, no hay gradientes térmicos internos. Se aprecia en cada tiempo un baño más o menos isotérmico el cual se va calentando conforme avanza el tiempo.

En los mapas de temperatura se destaca que en la mayoría de experimentos hay una gran concordancia entre las dos réplicas, lo que da fe de un experimento robusto y controlado. Sin embargo, hay dos experimentos (*h* y *f*) en donde las réplicas no coinciden y cuyos resultados presentan en consecuencia incertidumbre. La corrección a estos dos experimentos con incertidumbre hubiese sido repetir los experimentos, sin embargo, la contingencia sanitaria impidió realizar los experimentos de nuevo.

En la Figura 3.1.2 se muestran los contornos de temperatura desde 0s hasta 1200s para el experimento 8 donde se aprecia el paulatino

incremento de temperatura de temperatura ambiente (24C) a 36C. Se destaca la presencia de algunas distorsiones ópticas en el baño; a partir de los 100 s de operación se visualizan algunas sombras a los costados del modelo, la inyección del gas para este experimento fueron dos tapones a 4/5 del radio, por lo que las burbujas primarias y libres para este caso específico son las causantes del incremento de ruido en las mediciones de PLIF.

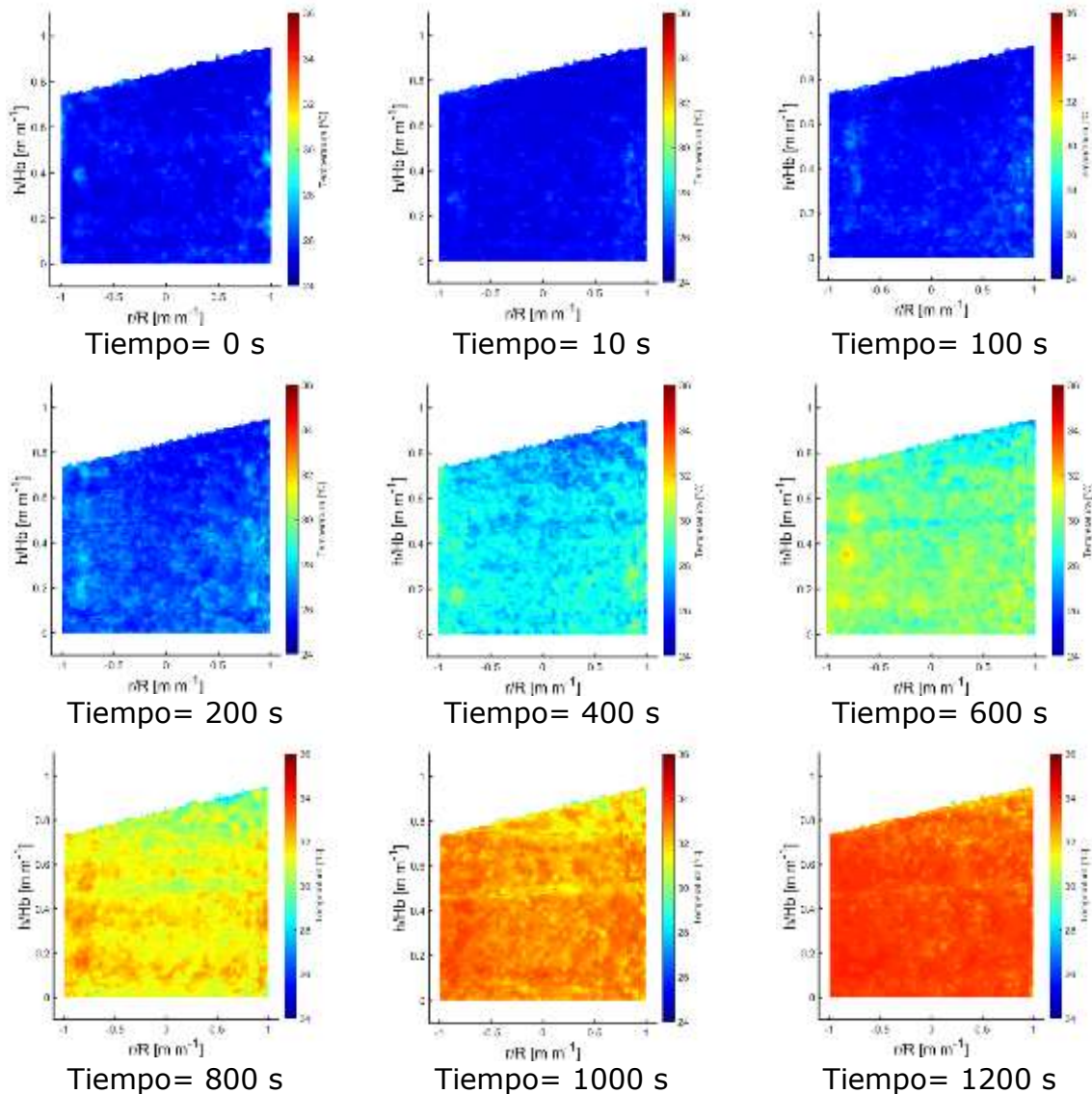


Figura 3.1.2. Evolución de la temperatura en el tiempo, mapas de temperatura obtenidos con la técnica PLIF para el Experimento 8.

De igual forma se aprecian fluctuaciones en la temperatura asociadas a la estratificación térmica del baño, ya que las curvas se construyeron con la

temperatura promedio del baño, no de un punto en específico, para esclarecer este concepto se tiene la Figura 3.1.3 que muestra el mapa de temperatura al tiempo final de cada uno de los experimentos en el plano de medición. En esta figura se visualizan las oscilaciones de temperatura a lo largo del plano asociadas a diferentes factores como la posición del láser o la cámara, por lo tanto, se entiende que al tener este sistema en agitación las fluctuaciones se harían más evidentes al tener no sólo los antecedentes ópticos asociados a la posición de los componentes experimentales, sino también los que se generan dentro del baño al tener algunas sombras asociadas a la agitación con burbujeo y a los mecanismos de transporte de energía que rigen el sistema a lo largo del tiempo.

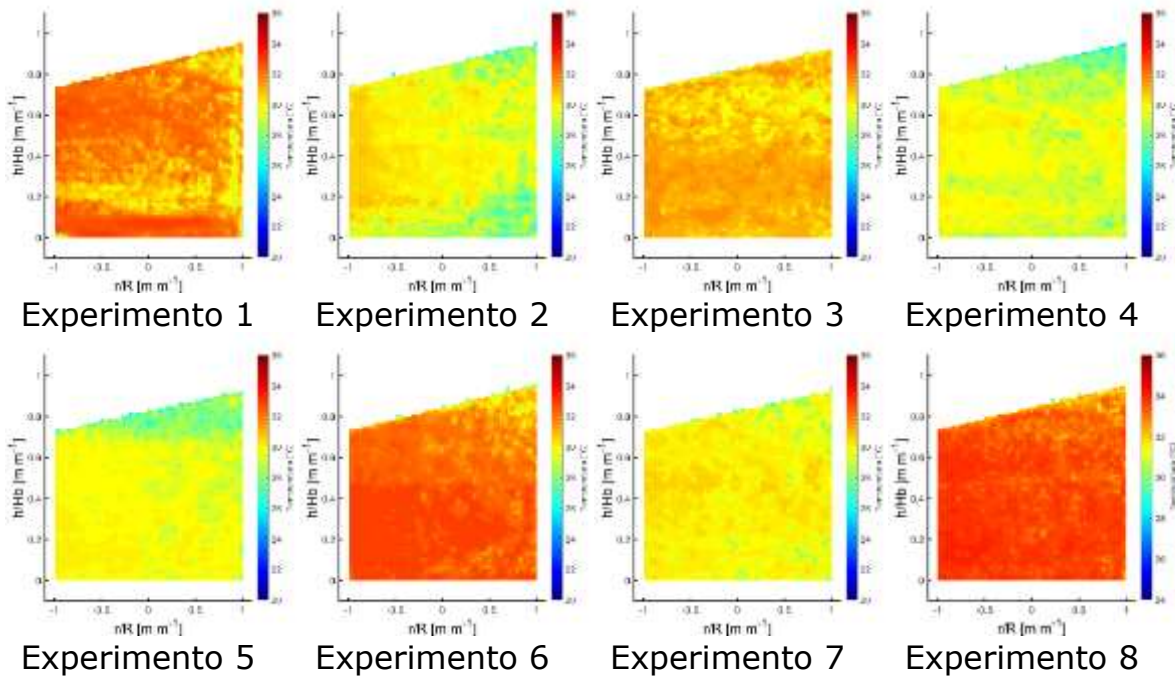


Figura 3.1.3. Contorno de Temperatura final de los 8 experimentos realizados al tiempo final o 20 minutos (1200 s).

Al hablar de aumento de temperatura en un sistema, consecuentemente, se asocia la transferencia de calor que propicia el mismo. A continuación se explica el procedimiento para calcular el aporte de calor en cada instante de la experimentación (con el cual se obtuvieron las curvas que se muestran en la Figura 3.1.4), así como el calor integral que se empleó para elevar la temperatura de cada uno de los experimentos.

El calor integral ganado por el agua se calculó con la ecuación:

$$\sum_{i=1}^{1200} Q_i = V * \rho(T) * Cp(T) * \Delta T \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

$Q_i$ =Calor [KJ] en un intervalo de tiempo;

$V$ =Volumen del modelo [m<sup>3</sup>] = 0.082 m<sup>3</sup>

$\Delta T = T_{i+1} - T_i$ , que mide el cambio de temperatura en un intervalo de tiempo;

$\rho(T)$ =Densidad [kg/m<sup>3</sup>], dada por la ecuación (8):

$$\rho(T)_{i=2} = Ax B^{-(1-T/TC)^n} \dots\dots\dots(8)$$

donde los valores de las contantes de la ecuación (8) son: A=0.34710, B=0.27400, TC[K]=647.13, n=0.28571

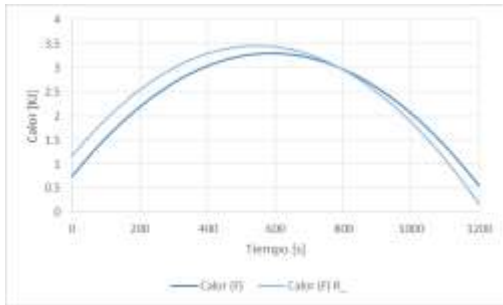
$Cp(T)$ = Capacidad Calorífica [KJ/KgK], dada por la ecuación (9):

$$\frac{Cp(T)_{i=2}}{R} = \alpha + \beta T + \zeta T^2 \dots\dots\dots(9)$$

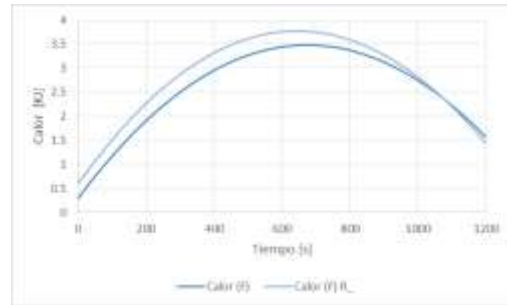
Donde los valores de las contantes son:  $\alpha=8.712$ ,  $(10^3)\beta=1.25$ ,  $(10^6)\zeta=-0.18$ .

Aplicando los datos de calentamiento de cada experimento, se puede generar una curva de calor ganado por el agua en función del tiempo como las que se presentan en la Figura 3.1.4\*. Además, la integración de cada curva en el tiempo total de la experimentación daría todo el calor que ganó el agua y tomando en cuenta que las latas de combustible son iguales, se usaron siempre nuevas con válvulas abiertas al 100%, entonces podemos inferir que el calor aportado por las latas es el mismo e independiente del experimento, por lo que el calor ganado del agua puede asociarse a la eficiencia térmica que a su vez depende de las condiciones específicas de operación de cada experimento.

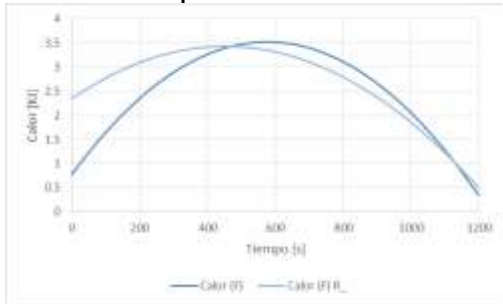
\* Nota: Para todos los casos, y con el objeto de eliminar las fluctuaciones o ruido en la temperatura y obtener una integración adecuada, se obtuvo una "Temperatura suavizada" al obtener una función de regresión de las curvas de calentamiento de la forma  $T(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$  .



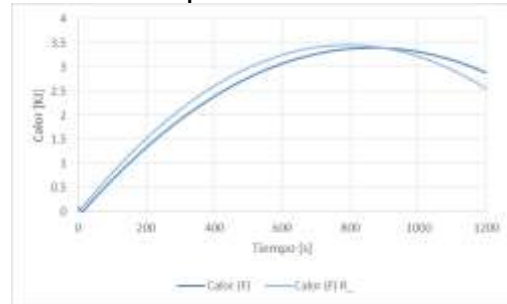
Experimento 1



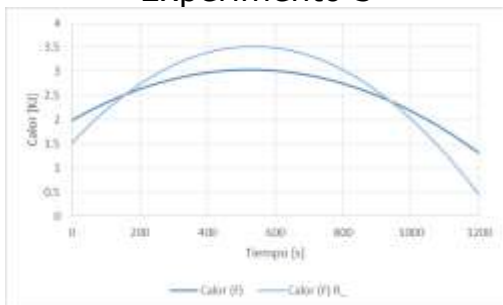
Experimento 2



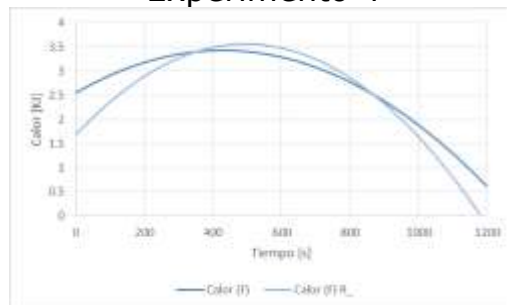
Experimento 3



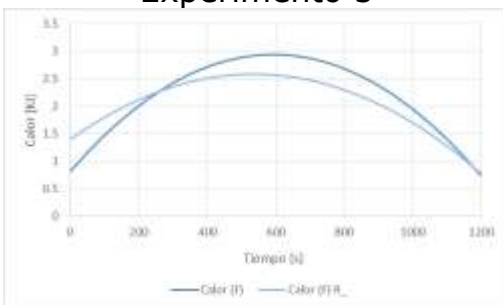
Experimento 4



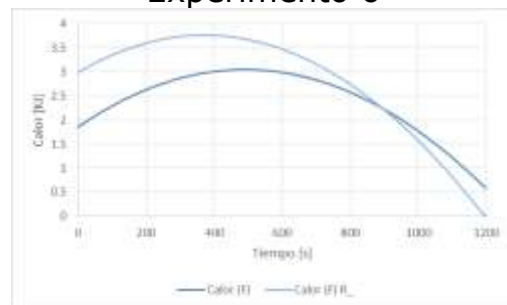
Experimento 5



Experimento 6



Experimento 7



Experimento 8

Figura 3.1.4. Curvas aporte de calor en el tiempo

Las curvas de calor que se presentan en la Figura 3.1.4 muestran un comportamiento similar a lo descrito en las curvas de calentamiento que se describieron anteriormente. La primera sección asociada a la estabilización del sistema hasta aproximadamente 100-200 s; en este



caso el punto máximo de transferencia de calor no sigue un patrón general, por lo que la localización del mismo se relaciona a las condiciones de cada uno de los experimentos, posterior a este punto se presenta el decaimiento de la transferencia de calor, que anteriormente se justificó en que el sistema está tan caliente que las pérdidas se equilibran con las entradas y posiblemente aunado al hecho de que la disminución del combustible en esos tiempos en la lata en comparación al que se tenía al inicio de los experimentos.

Al tener el calor integral para cada experimento fue posible calcular la eficiencia energética cuyo cálculo se ejemplifica a continuación contemplando el gasto de combustible y el calor de combustión teórico del mismo.

Considerando como base de cálculo 1 mol de mezcla (Considerando las proporciones del gas LP) se sabe que hay 0.4 mol de butano y 0.6 mol de propano, por lo que las masa en gramos se calculan:

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

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

Dando un total de  $23.2 + 26.4 = 49.6$  g mezcla. La fracción masa de cada componente se calcula como:

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

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

Se conoce pesando la lata antes y después de cada experimento que se consumen en 20 minutos 231.1 g de mezcla de gas, que corresponden al combustible utilizado en promedio para cada experimento, con lo que se pueden obtener los moles de propano y butano quemados en una combustión asumida al 100% de eficiencia.

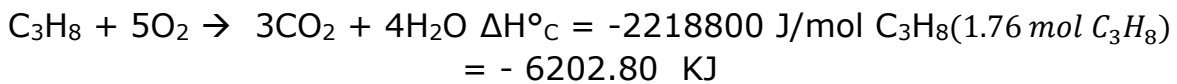
$$231.1 g_{mezcla}(0.47) \left( \frac{1 \text{ mol } C_4H_{10}}{58g C_4H_{10}} \right) = 1.86 \text{ mol } C_4H_{10}$$

$$231.1 g_{mezcla}(0.53) \left( \frac{1 \text{ mol } C_3H_8}{44g C_3H_8} \right) = 2.80 \text{ mol } C_3H_8$$

Entonces es posible calcular el calor de combustión de cada reacción:



$$(1.86 \text{ mol } C_4H_{10}) = -5364.87 \text{ KJ}$$



Por lo que el calor total,  $Q_T$ , que sale de la flama es de 11567.67 KJ. Este es el calor aportado por la flama en 20 minutos de operación independientemente del experimento, por lo que si dividimos el calor ganado por el agua entre el calor total aportado por la flama podemos obtener la Eficiencia Energética por medio de la ecuación (10):

$$\%Ef. \text{ Energética} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{1200} Q_i}{Q_T} \right) \times 100 \dots \dots \dots (10)$$

También se puede calcular el  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  que se define como la temperatura promedio final del agua menos la temperatura inicial del agua. Los valores de los resultados correspondientes al  $\Delta T_{m\acute{a}x}$ , desviación estándar de la temperatura promedio del agua, el calor integral ganado por el agua y la eficiencia energética de los experimentos y sus réplicas se presentan a continuación en gráficos de barras para su análisis en las Figuras 3.1.5, 3.1.6, 3.1.7 y 3.1.8; así como sus valores numéricos promedio en la Tabla 3.1.1.

El  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  se calculó con la diferencia entre la temperatura final y la temperatura inicial tras los 20 minutos de operación, la Figura 3.1.5 muestra que los valores máximos obtenidos de sobrecalentamiento corresponden a los experimentos 2 y 6, superando los 10 °C, sus condiciones de operación fueron flujo de 9 L/min, con inyección a 1/3 del radio, variando únicamente el número de tapones entre los dos experimentos, un tapón en el experimento 2 y dos tapones en el experimento 6, sin embargo, en este último se presenta una desviación considerable respecto a su réplica ( ver Tabla 3.1.1). Por otro lado, el experimento 7 es el que presenta el menor incremento en la temperatura sobrepasando apenas los 8.07°C en promedio, las variables de operación

de este experimento fueron un flujo de 1 L/min con dos inyectores a 4/5 del radio.

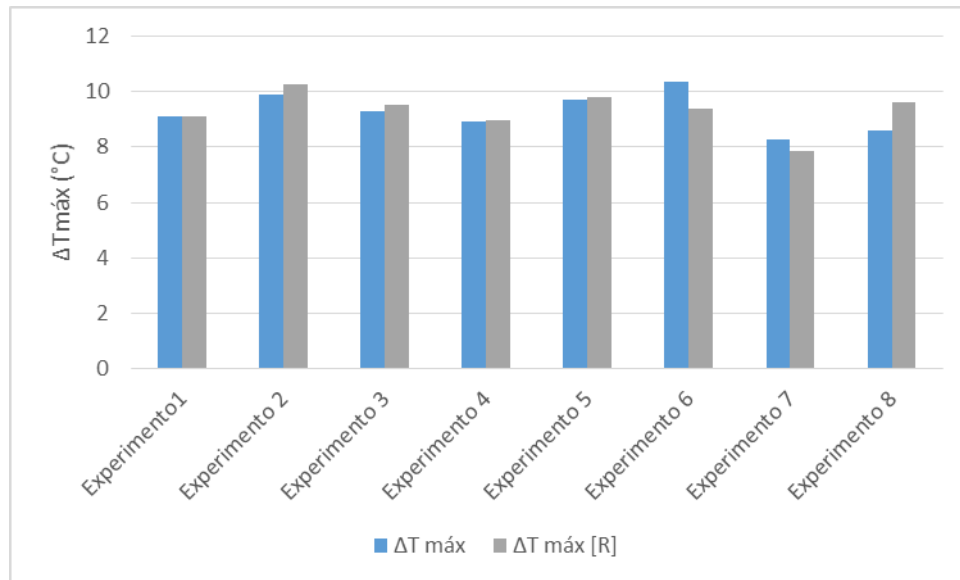


Figura 3.1.5.  $\Delta T_{máx}$  obtenido de los Experimentos y su réplica

La desviación estándar en un principio se planteó como un posible criterio de estratificación térmica del baño, sin embargo, esta idea se descartó al haber obtenido los valores numéricos de esta medida de dispersión, que como es posible denotar en el gráfico no superan el valor de  $0.2^{\circ}\text{C}$  en ninguno de los casos, así como los contornos de temperatura del plano de medición en los cuales se muestra homogeneidad en el mismo (ver Figura 3.1.3). Por lo que estos valores únicamente se asociaron al ruido de la técnica, que si bien está asociado a las condiciones de operación del sistema, también lo está en gran medida a factores propios de la óptica de la técnica que ya se han mencionado anteriormente; la posición del láser, las sombras producidas por las burbujas, etc. Los valores sobresalientes para esta medición se presentaron en el experimento 4, donde se presentaron los valores máximos en la desviación estándar (en promedio  $0.1842^{\circ}\text{C}$ ), cuyas condiciones de operación fueron un tapón a 4/5 del radio con un flujo de 9 L/min. Por otro lado el valor mínimo (en promedio  $0.1103^{\circ}\text{C}$ ) se presentó en el experimento 7 donde las variables de operación del mismo fueron un flujo de 1 L/min con dos inyectores a 4/5 del radio; esto se refleja en el gráfico de la Figura 3.1.6.

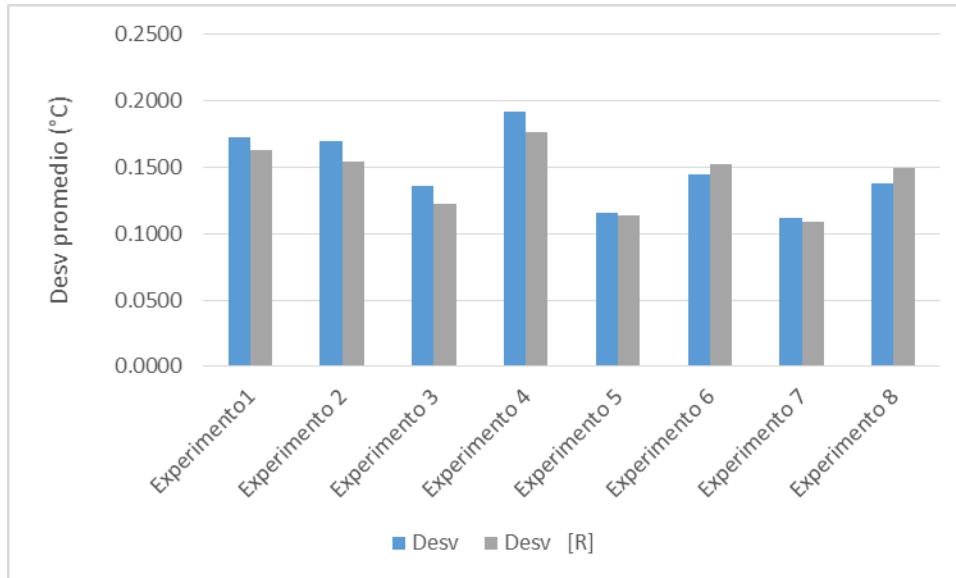


Figura 3.1.6. Desviación estándar promedio de los experimentos realizados y su réplica.

Anteriormente se describió a detalle cómo se realizó el cálculo para obtener el calor integral absorbido por el baño de agua durante los experimentos; la Figura 3.1.7 muestra un gráfico con los valores obtenidos para cada uno de los experimentos con su respectiva réplica, en ellos se destacan los experimentos 2 y 7; con el calor máximo absorbido (3266 KJ) y el calor mínimo absorbido (2571 KJ) respectivamente. Sus condiciones de operación fueron mencionadas anteriormente, ya que concuerdan con el  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  como se esperaba.

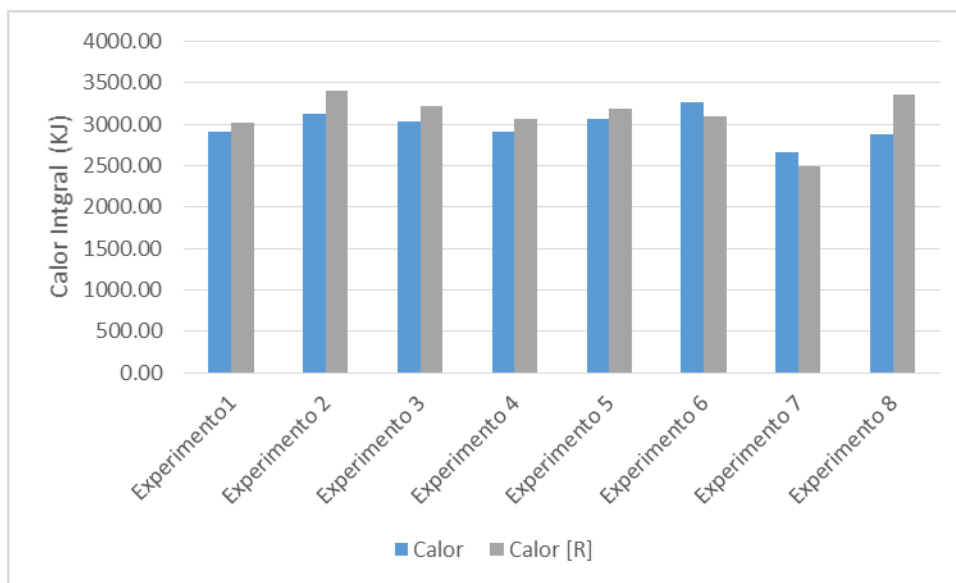


Figura 3.1.7. Calor integral absorbido por el baño de agua durante los experimentos y su réplica.

La eficiencia energética para todos los experimentos mostró valores similares, por lo que se considera que el aporte de energía proporcionado por la combustión del gas utilizado en los experimentos era mayormente disipada por convección a los alrededores incrementando incluso la temperatura de otros componentes del sistema como la estructura metálica que soportaba las latas de combustible. El experimento 5 fue el que presentó en promedio una mayor eficiencia energética en comparación con los demás, sus condiciones de operación fueron dos tapones ubicados a 1/3 del radio con flujo bajo; mientras que la menor eficiencia energética se presentó en el experimento 7 cuyas condiciones de operación ya se han descrito antes, flujo de 1 L/min con dos inyectores a 4/5 del radio.

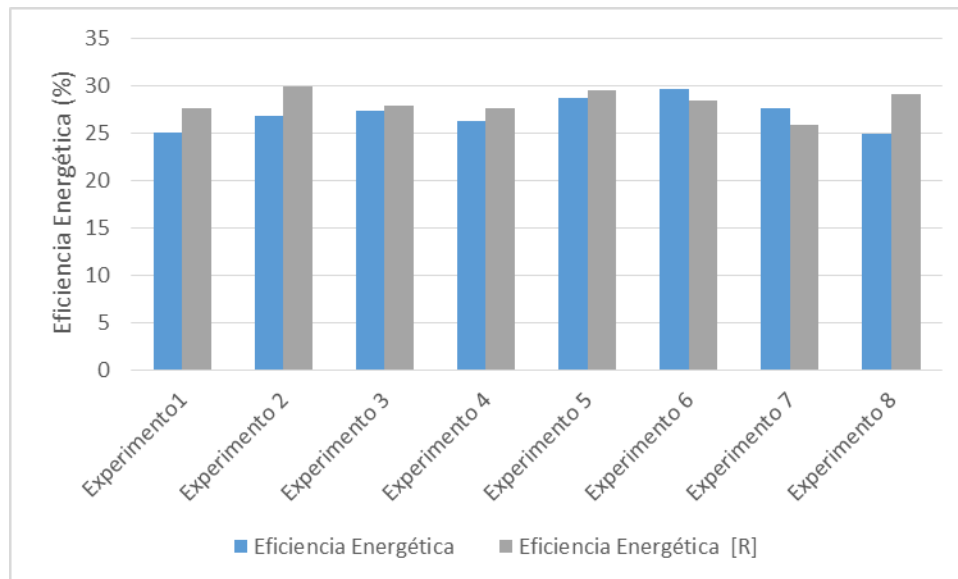


Figura 3.1.8. Eficiencia Energética en los experimentos y su réplica.

Al presentar estos valores es precoz establecer condiciones óptimas para el mezclado térmico en el sistema, ya que si bien se busca el mayor incremento en la temperatura ( $\Delta T_{m\acute{a}x}$ ), la mayor eficiencia energética- la cual va relacionada al calor integral suministrado al baño- y preferentemente presentar el menor ruido posible en la técnica, no se tiene concordancia con un experimento específico que refleje esas condiciones. Únicamente sobresalen tanto el experimento 2 y 5, que mostraron resultados favorables para las condiciones mencionadas, no obstante, concuerdan sólo con la posición de la inyección que fue a 1/3 del radio. Al retomar el trabajo de Ana Gómez, se señala como una variable de importancia la relación entre la posición del suministro de calor y la posición de inyección del gas, que se ve reflejada en estos

mismos experimentos, por lo que este factor será tomado en cuenta en lo subsecuente. Por otro lado, el experimento 7 mostró la peor eficiencia térmica para las condiciones establecidas, sin embargo, resulta impreciso señalar sus variables de operación como desfavorables para el mezclado térmico, ya que tanto el flujo de 1 L/min, así como los 2 tapones de inyección, se presentan en el experimento 5 siendo algo redundante.

Tabla 3.1.1. Resultados numéricos promedio.

Experimento (matriz)	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)	Desv. Medición (°C)	Calor integral (kJ)	Eficiencia energética (%)
1	9.12 ± 0.01	0.1679 ± 0.0070	2960 ± 82	27.36 ± 2.00
2	10.07 ± 0.25	0.1620 ± 0.0107	3266 ± 202	27.95 ± 1.36
3	9.41 ± 0.15	0.1289 ± 0.0093	3125 ± 127	27.22 ± 0.69
4	8.96 ± 0.03	0.1842 ± 0.0108	2988 ± 113	27.96 ± 1.38
5	9.77 ± 0.06	0.1149 ± 0.0011	3121 ± 80	29.04 ± 0.59
6	9.87 ± 0.67	0.1485 ± 0.0060	3176 ± 121	27.89 ± 1.61
7	8.07 ± 0.30	0.1103 ± 0.0021	2571 ± 124	26.86 ± 1.88
8	9.11 ± 0.74	0.1435 ± 0.0085	3118 ± 344	27.00 ± 2.98

### 3.2 Resultados de Transporte de Momentum

Debido a que resulta impráctico analizar el mezclado térmico únicamente con mapas de temperatura considerando el flujo, el número y la posición de inyectores como las variables clave, el presente trabajo se auxilió del estudio de Manuel Flores [28] sobre la fluido dinámica de una olla agitada con gas. Su trabajo proporcionó las líneas de corriente, los contornos de disipación de energía cinética turbulenta, los contornos de velocidad y los vectores de velocidad en el baño siendo éstos una importante herramienta para el análisis cualitativo de la forma en la que se realiza el mezclado térmico por los mecanismos de convección y dispersión turbulenta.

En las siguientes figuras se muestran los experimentos auxiliares, así como las condiciones de operación de cada uno de los mismos, donde la

variable de análisis se modificó mientras que las otras se mantuvieron inalterables ya sea en su nivel alto o bajo. Además las figuras se fraccionaron en incisos para facilitar el análisis y se presentan en la siguiente forma; en los incisos (a) y (b) los vectores de velocidad obtenidos, en los incisos (c) y (d) los contornos de velocidad, los contornos de disipación de energía turbulenta en los incisos (e) y (f), y finalmente las líneas de corriente en los incisos (g) y (h). Tanto los contornos de energía cinética turbulenta como los de velocidad poseen una escala de colores en donde los valores ascienden en orden de las tonalidades azules a las rojizas.

### *Efecto del Flujo de gas*

Para determinar el efecto del flujo de gas en el mezclado térmico se presentan las Figuras 3.2.1 y 3.2.2 para experimentos 1 y 2 y para experimentos 7 y 8 respectivamente pasando de casos de bajo (1 y 7) a casos de alto flujo (2 y 8) manteniendo el resto de variables sin cambio; donde se visualiza que al incrementar el flujo se aumenta también el tamaño de los vectores de velocidad de 'a' respecto a 'b' y que también es apreciable en los contornos de velocidad en 'c' y 'd', respectivamente, al abarcar un área mayor en el plano y resaltando la zona de inyección con los valores más altos en color rojo, siendo un indicativo del aumento de la velocidad del fluido, por lo tanto propiciando mayor turbulencia en el sistema; en los incisos 'e' y 'f' de ambas figuras se denota un aumento de la energía cinética turbulenta del fluido al aumentar el flujo, fenómeno que teóricamente contribuye de manera favorable con el mezclado térmico por el mecanismo de transporte de energía de dispersión turbulenta, por su parte las líneas de corriente muestran que al incrementar el flujo se genera un mayor número de corrientes en el área del plano de 'g' a 'h', la importancia de estas corrientes recae en la recirculación que se genera con las mismas aumentando el mecanismo de transporte de energía por convección forzada. Bajo estas condiciones se establece cualitativamente que el aumento de flujo favorece el mezclado térmico de la olla.

Al comparar ambas figuras con el flujo de 9 L/min se puede apreciar que al mantener las otras variables en su nivel bajo la pluma se concentra en la zona de aplicación de calor, así como una mayor recirculación del fluido en todo el plano, pudiendo favorecer así el calentamiento del baño, en contraste, al presentar el flujo con las otras variables en su nivel alto, se visualiza un "corte" casi axisimétrico de la pluma respecto al centro del

plano, generando una zona de poca recirculación en la parte central inferior del plano. Lo anterior refleja la importancia de las otras variables en el sistema y su interacción conjunta en el mismo, sin embargo su análisis queda fuera de los límites del presente trabajo dada su complejidad.

Experimento 1 Q(-) r/R(-) n(-)

Experimento 2 Q(+) r/R (-) n(-)

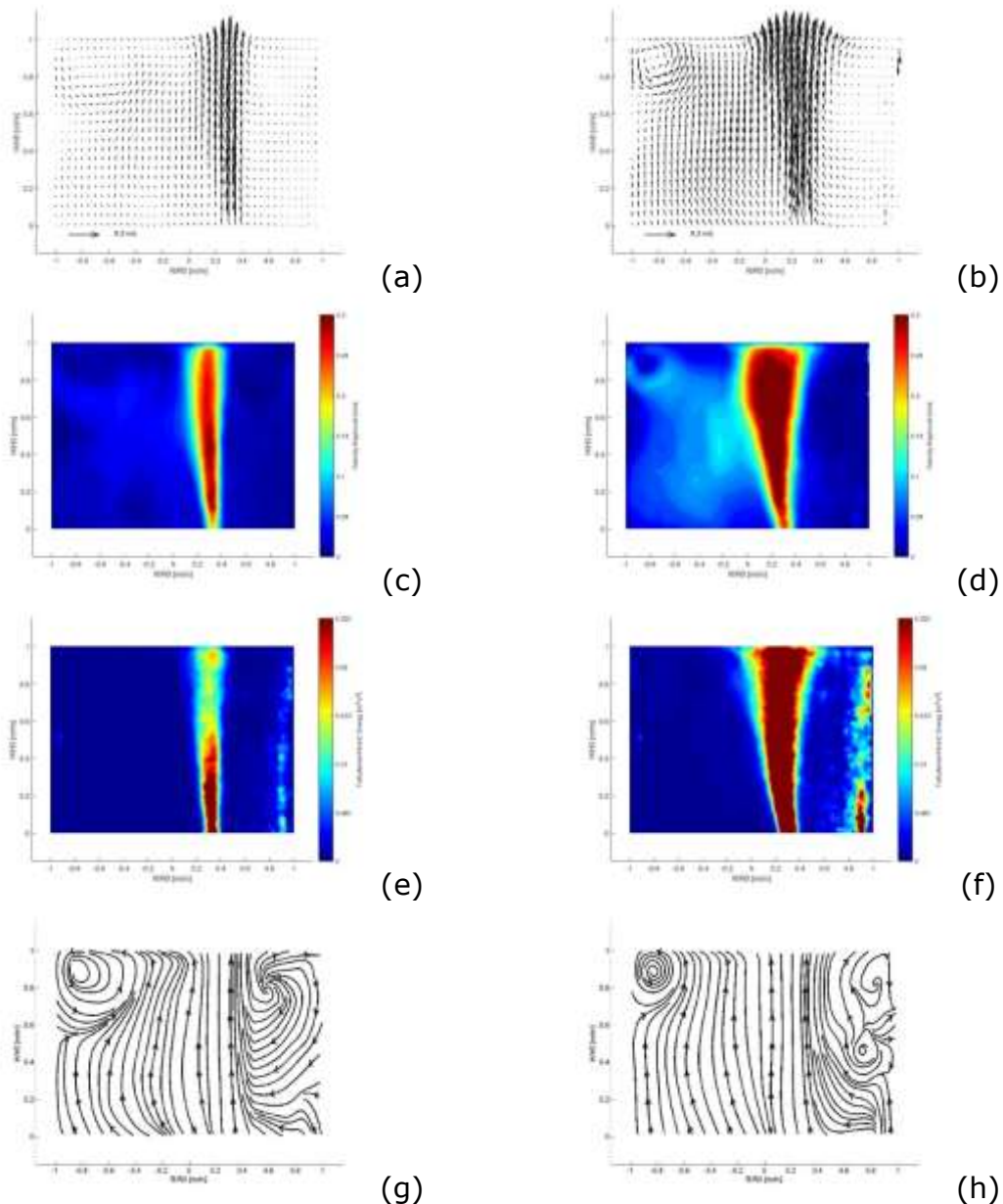
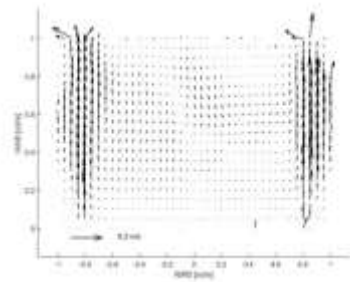


Figura 3.2.1 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 1 y 2 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

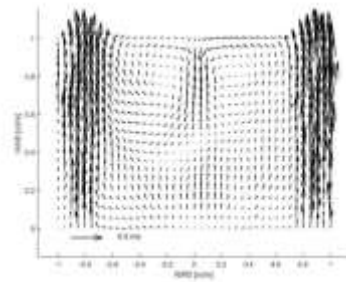


Experimento 7  $Q(-)$   $r/R(+)$   $n(+)$

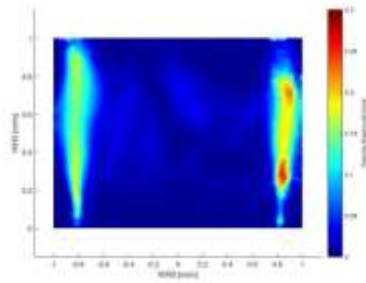
Experimento 8  $Q(+)$   $r/R(+)$   $n(+)$



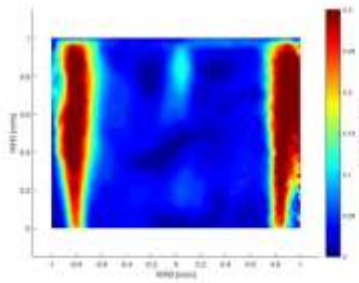
(a)



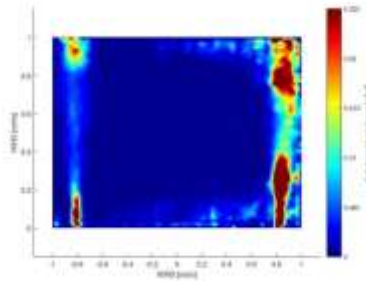
(b)



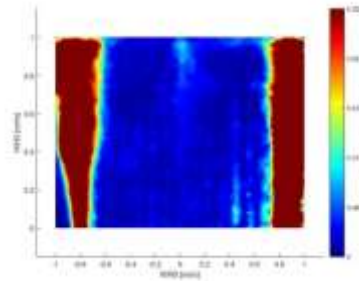
(c)



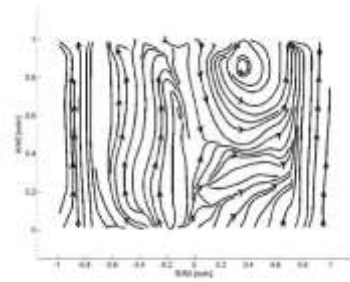
(d)



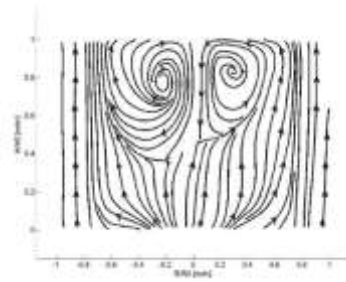
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.2.2 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 7 y 8 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

### *Efecto de la Posición de Inyectores*

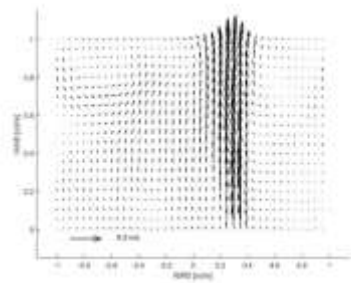
Con el antecedente del trabajo de Ana Gómez se tiene como hipótesis que el acercamiento de la posición de inyección del gas a la zona de suministro de calor favorece el mezclado térmico, al incrementarse la temperatura

en un periodo establecido de tiempo; tomando en cuenta lo anterior se analizaron las Figuras 3.2.3 y 3.2.4 para experimentos 1 y 3 y para experimentos 6 y 8 respectivamente pasando de casos de baja (1 y 6 con  $r/R=1/3$ ) a casos de alta posición radial de tapones (6 y 8 con  $r/R=4/5$ ) manteniendo el resto de variables sin cambio; al observar los vectores de velocidad se tiene que en la posición de  $1/3$  del radio (a) estos se dispersan en el resto del baño con mayor magnitud que los que se presentan a  $4/5$  del radio (b), por lo tanto se tiene mayor velocidad en el fluido en esta condición y mayor turbulencia, sin embargo, los contornos de velocidad muestran que a  $1/3$  del radio en (c) se tiene que en las esquinas hay poca actividad de fluido pudiendo generar gradientes térmicos; en los contornos de energía cinética turbulenta se aprecia que en (e) se presenta una mayor difusión de la ésta a  $1/3$  del radio en comparación con (f) donde toda la energía se concentra prácticamente en la zona de inyección dificultando así la dispersión en el resto del baño; las líneas de corriente muestran que la inyección a  $1/3$  del radio (g) propician que las corrientes recirculatorias abarquen una mayor área en el baño en contraste con las que se generan a  $4/5$  del radio.

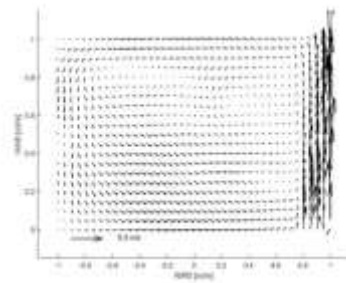
Al comparar ambas figuras con la condición a  $1/3$  del radio se observa que con las otras variables en sus niveles altos –Figura 12- se propicia una mayor turbulencia en el fluido que se refleja en la magnitud de los vectores y el alcance de éstos en el baño, la dispersión de la energía cinética turbulenta en (e) también presenta valores más altos de acuerdo a la escala de colores en una mayor área del plano, de igual forma las corrientes recirculatorias son múltiples y abarcan prácticamente toda el área del plano.

Experimento 1 Q (-) r/R (-) n(-)

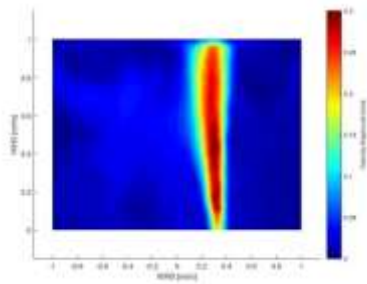
Experimento 3 Q (-) r/R (+) n (-)



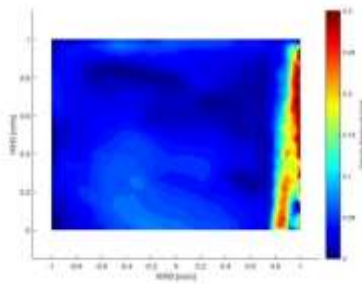
(a)



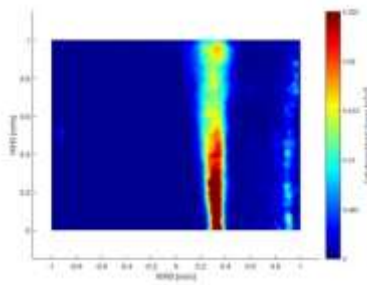
(b)



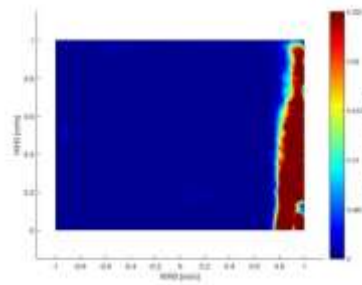
(c)



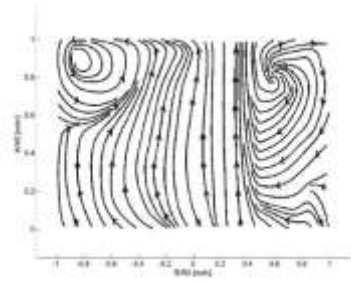
(d)



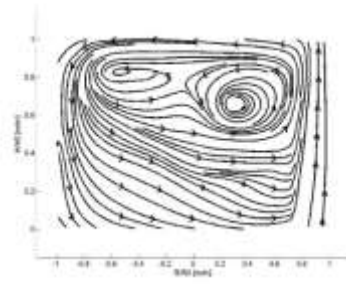
(e)



(f)



(g)

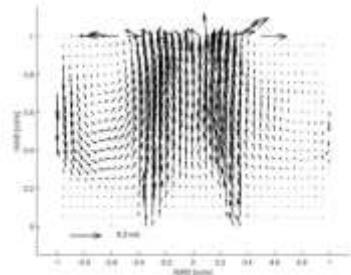


(h)

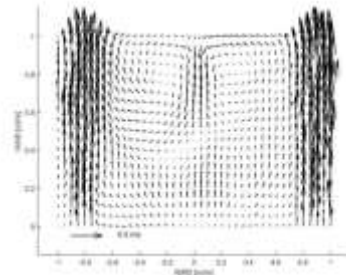
Figura 3.2.3 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 1 y 3 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

Experimento 6 Q (+) r/R (-) n(+)

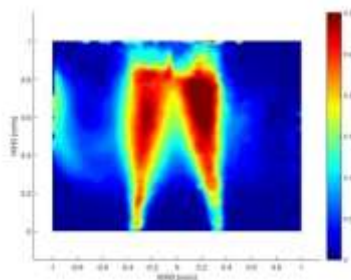
Experimento 8 Q(+) r/R (+) n(+)



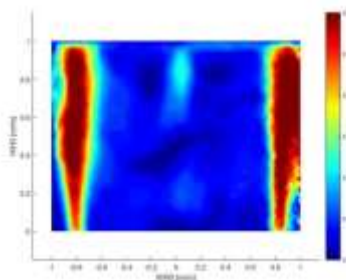
(a)



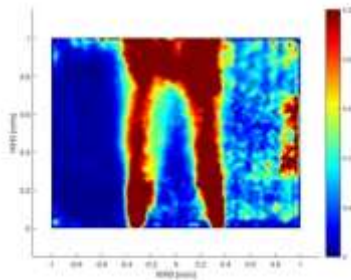
(b)



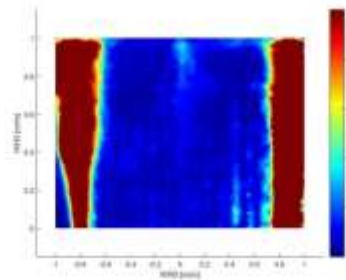
(c)



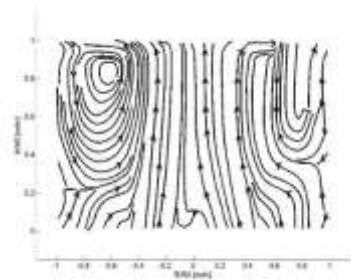
(d)



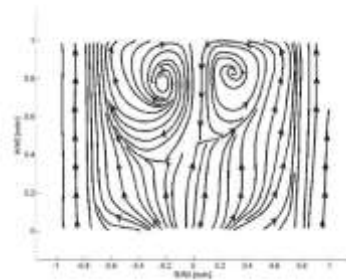
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.2.4 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 6 y 8 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

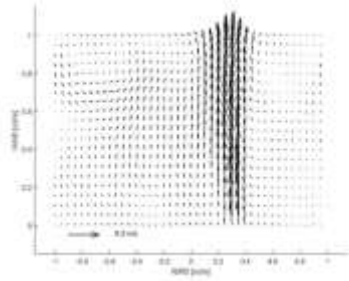
### *Efecto del número de inyectores*

Para el análisis del efecto del número de inyectores se presentan las Figuras 3.2.5 y 3.2.6 para experimentos 1 y 5 y para experimentos 4 y 8 respectivamente pasando de casos de un tapón (1 y 5) a casos de dos tapones (4 y 8) manteniendo el resto de variables sin cambio; en los vectores de velocidad no se observa un cambio significativo en cuanto a la densidad y el tamaño de los vectores al comparar 'a' y 'b'; pero en los incisos 'c' y 'd' es posible ver en los contornos de velocidad que ésta presenta valores más altos en 'c' correspondiente a un solo inyector al presentar zonas azules en tonalidades más claras en el área del plano, sin embargo, resulta contradictorio el que los contornos de energía cinética turbulenta presenten este fenómeno invertido, al tener tonalidades azules más claras en 'f' con respecto a 'e', siendo 'f' el experimento que presenta dos inyectores, es en las líneas de corriente donde se puede estimar que al generar un mayor número de corrientes recirculatorias en 'h' correspondiente a dos inyectores se favorecería el mezclado térmico con esta condición.

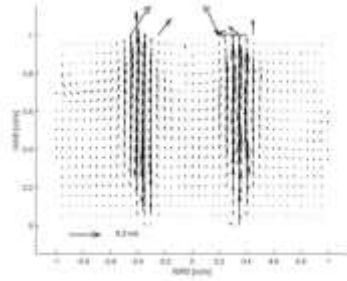
Al comparar los experimentos 5 y 8 que son los que presentan dos inyectores, se observa que en el experimento 8 las corrientes recirculan en el área céntrica superior del plano generando una zona de poca actividad en la zona inferior de éste, mientras que en 5, las corrientes generadas abarcan toda el área del plano, cabe destacar que fue este experimento el que presentó la mayor eficiencia energética respecto a los otros.

Experimento 1 Q(-) r/R (-) n(-)

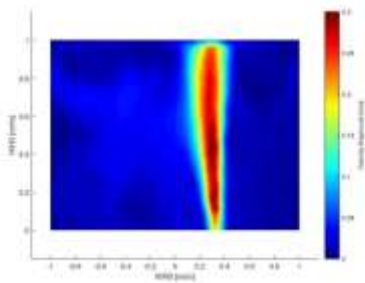
Experimento 5 Q(-) r/R(-) n(-)



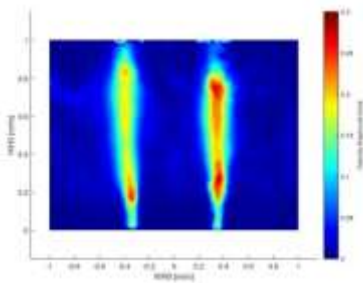
(a)



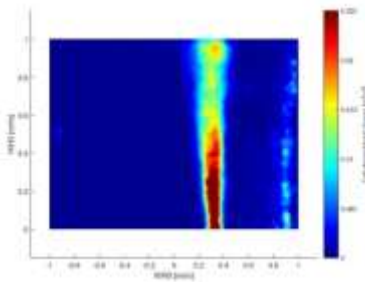
(b)



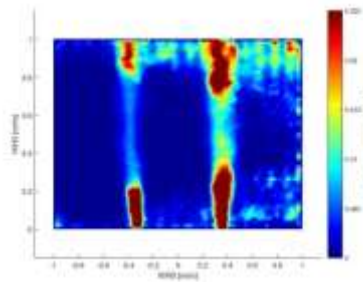
(c)



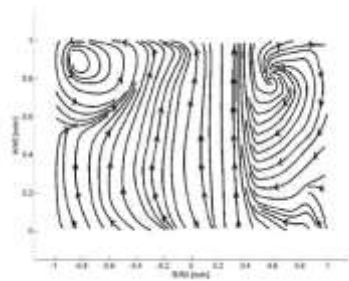
(d)



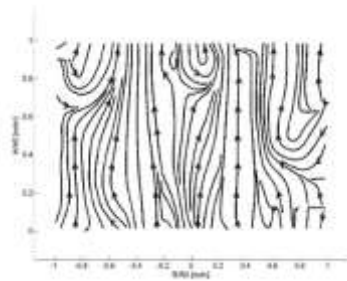
(e)



(f)



(g)

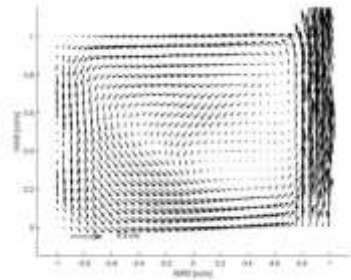


(h)

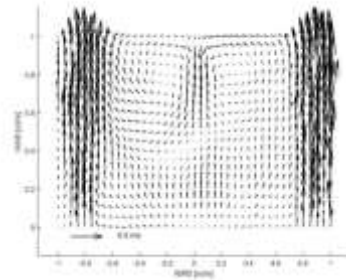
Figura 3.2.5 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 1 y 5 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

Experimento 4 Q(+)  
r/R(+)  
n(-)

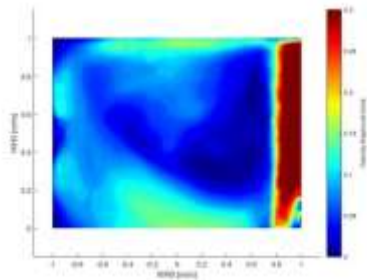
Experimento 8 Q(+)  
r/R(+)  
n(-)



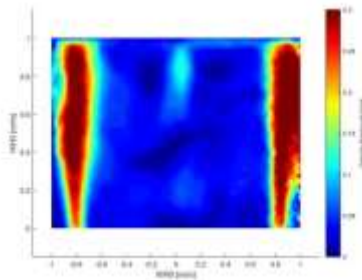
(a)



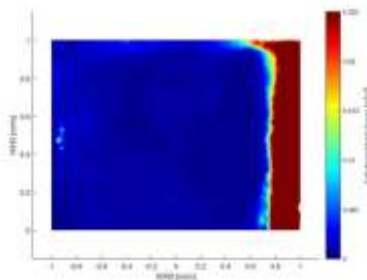
(b)



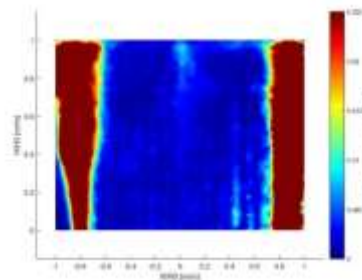
(c)



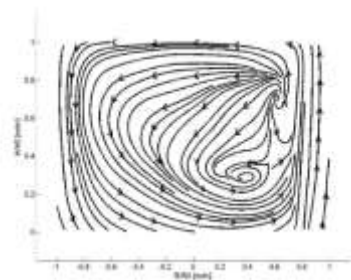
(d)



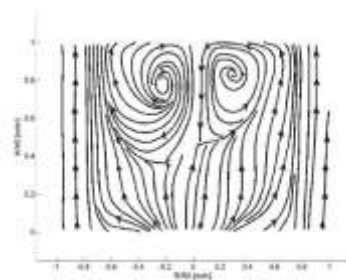
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.2.6 Contornos proporcionados por la técnica PIV para los experimentos 4 y 8 (izquierda y derecha) para campos vectoriales de velocidad (a y b), magnitud de velocidad del líquido (c y d), energía cinética turbulenta (e y f) y líneas de corriente (g y h).

En resumen, se considera que las variables de flujo a 9L/min, la posición de inyección a 1/3 del radio y dos inyectores, son las que cualitativamente y aisladas entre sí, podrían favorecer el mezclado térmico en la olla; presentando una mayor velocidad en el fluido, propiciando consecuentemente mayor turbulencia, un mayor número de corrientes recirculatorias que abarcan un área extensa del plano y presentando mayor energía cinética turbulenta, ya que con estas condiciones se incrementan las tasas de transferencia de calor por convección y dispersión turbulenta. Dichas condiciones propiciarían un mayor un mayor aumento de temperatura y por lo tanto una mayor eficiencia energética.

### 3.3 Análisis Estadístico

Con los resultados del PIV fue posible estimar cualitativamente el efecto de las variables en el mezclado térmico, sin embargo, el efecto de las variables en combinación con otras se estimó con el análisis estadístico proporcionado por el programa Minitab® al analizar las respuestas referentes al  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  y la eficiencia energética; queda destacar que en el presente análisis fueron descartados los resultados de los experimentos 6 y 8, debido a la desviación estándar entre las temperaturas alcanzadas con su réplica, alterando la tendencia entre los otros experimentos , por lo tanto, se presenta un diseño no ortogonal.

#### Efecto de las variables en el $\Delta T_{m\acute{a}x}$

En la Tabla 3.3.1 se muestra el análisis estadístico para la respuesta del  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  en donde se identifica al flujo de gas y la posición de inyectores como las variables individuales significativas al presentar un valor P menor a 0.05, teniendo el flujo de gas un efecto positivo (Tabla 3.3.2) incrementando en promedio 0.6590 °C el  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  al pasar de un flujo de 1L/min a 9L/min concordando con lo visto en los resultados de PIV mostrados en las Figuras 9 y 10, al incrementar el tamaño de los vectores de velocidad y por lo tanto la turbulencia en el sistema, propiciando la recirculación de agua en el baño e incrementando también el mecanismo de dispersión tubulenta ya que aumenta la energía cinética turbulenta al aumentar el flujo de gas. Por su parte la posición de los inyectores tiene un efecto negativo disminuyendo en promedio 0.8045 °C el  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  al pasar de 1/3 del radio a 4/5 del radio, concordando con la hipótesis de que al acercar el punto de inyección del gas al punto de suministro de calor, favorece el incremento de la temperatura; ya que la pluma se encuentra



justo donde se da la mayor transferencia de calor en el baño y la misma se dispersa en todo el plano concordando con el análisis de las Figuras 11 y 12. Otras variables significativas para la respuesta del  $\Delta T_{\text{máx}}$  se presentaron en el efecto triple del flujo, posición y número de inyectores, al tener un efecto positivo incrementando en promedio 0.5957 °C el  $\Delta T_{\text{máx}}$ , la interacción doble del flujo y el número de inyectores con un efecto positivo incrementando en promedio 0.4050°C el  $\Delta T_{\text{máx}}$  y finalmente la interacción doble de la posición y el número de inyectores con un efecto negativo al disminuir en promedio 0.3985 °C el  $\Delta T_{\text{máx}}$ . El efecto de las variables y sus interacciones se refleja en el gráfico de Pareto mostrado en la Figura 3.3.1

Tabla 3.3.1. Análisis estadístico para la respuesta del  $\Delta T_{\text{máx}}$

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Valor P
Q	1	1.3897	1.3897	46.35	0
r/R	1	2.0711	2.0711	69.07	0
N	1	0.01321	0.01321	0.44	0.532
Q*r/R	1	0.03184	0.03184	1.06	0.343
Q*N	1	0.52488	0.52488	17.5	0.006
r/R*N	1	0.50817	0.50817	16.95	0.006
Q*r/R*N	1	1.13574	1.13574	37.88	0.001
Error	6	0.17991	0.02999		
Total	13	6.29589			

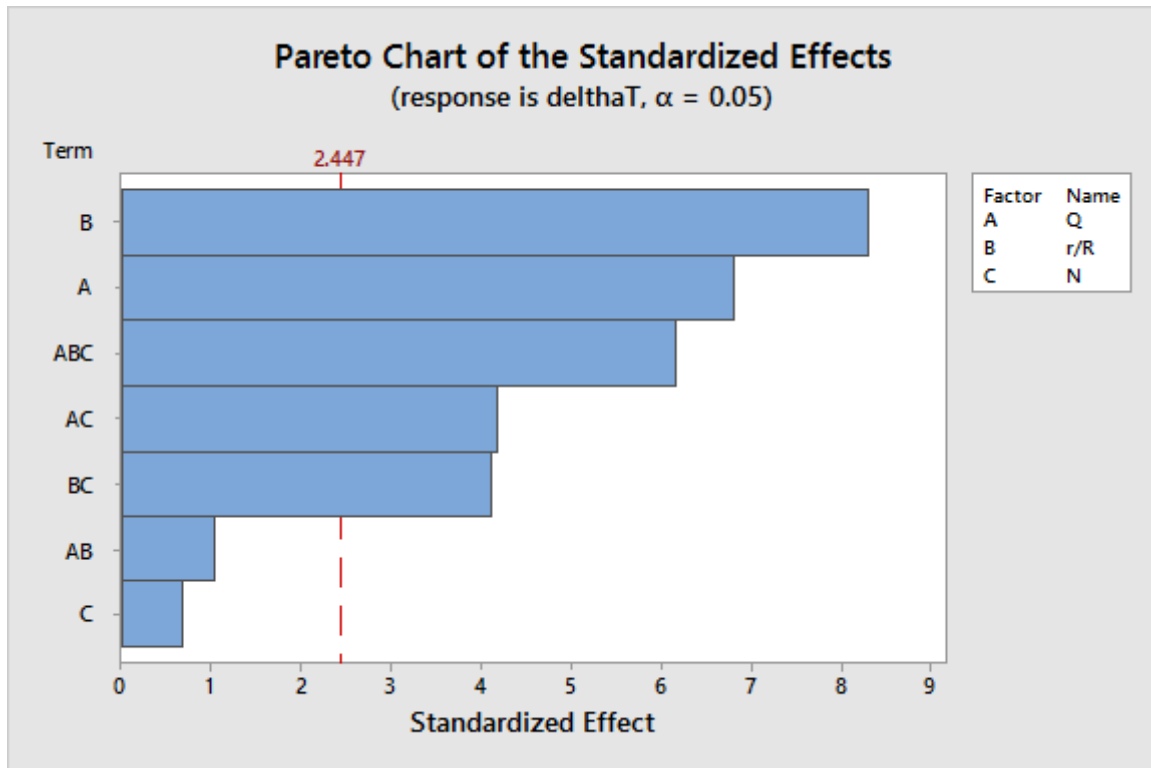


Figura 3.3.1 Gráfico de Pareto para la respuesta del  $\Delta T_{\text{máx}}$  en función de las variables de estudio

Tabla 3.3.2. Efecto de las variables en el  $\Delta T_{\text{máx}}$

Variable	Efecto	Error estándar
Q	0.659	$\pm 0.0484$
r/R	-0.8045	$\pm 0.0484$
N	0.0643	$\pm 0.0484$
Q*r/R	-0.0998	$\pm 0.0484$
Q*N	0.405	$\pm 0.0484$
r/R*N	-0.3985	$\pm 0.0484$
Q*r/R*N	0.5957	$\pm 0.0484$

### Efecto de las variables en la Eficiencia Energética

En la Tabla 3.3.3 se presenta el análisis estadístico sobre la respuesta de la eficiencia energética del sistema, donde se presenta al flujo de gas

como la variable individual más significativa al presentar un valor P menor a 0.05, presentando un efecto positivo –Tabla 3.3.4- incrementando en promedio la eficiencia energética en un 2.5380 % al pasar de un flujo de 1L/min a 9L/min, de acuerdo a los contornos generados por el PIV la absorción de calor en el baño se favorece al incrementar la velocidad del fluido, al generar mayor energía cinética turbulenta que dispersa el calor en todo el baño, mientras que las corrientes recirculatorias propician el movimiento de fluido en todo el plano incrementando la convección. La interacción triple del flujo, número y posición de inyectores también presentó un valor P menor a 0.05, teniendo un efecto positivo en el sistema incrementando la eficiencia en 2.479% (ver Pareto en la Figura 3.3.2).

Tabla 3.3.3 Análisis estadístico para la respuesta del  $\Delta T_{\text{máx}}$

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Valor P
Q	1	20.6152	20.6152	14.51	0.009
r/R	1	6.9937	6.9937	4.92	0.068
N	1	0.0017	0.0017	0	0.973
Q*r/R	1	0.5854	0.5854	0.41	0.545
Q*N	1	7.8189	7.8189	5.5	0.057
r/R*N	1	2.8494	2.8494	2.01	0.206
Q*r/R*N	1	19.6642	19.6642	13.84	0.01
Error	6	8.5246	1.4208		
Total	13	71.8469			

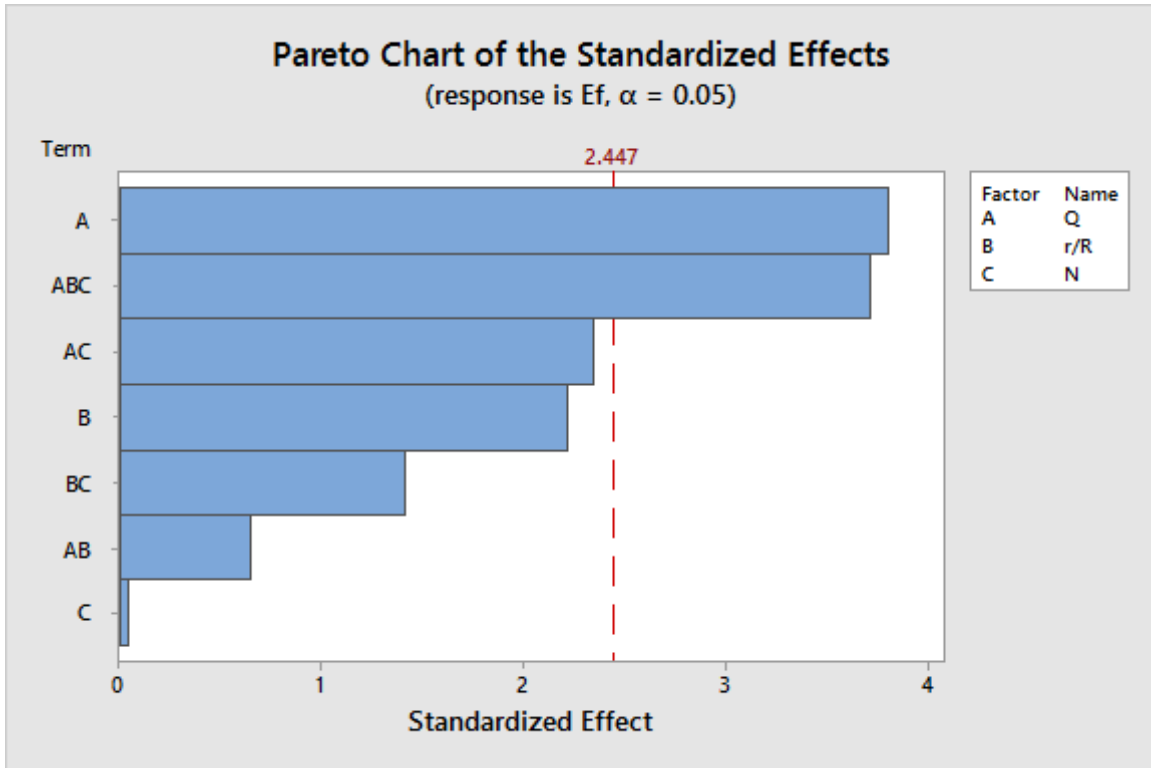


Figura 3.3.2 Gráfico de Pareto para la respuesta de la eficiencia energética en función de las variables de estudio

Tabla 3.3.4. Efecto de las variables en la eficiencia energética.

Variable	Efecto	Error estándar
Q	2.538	$\pm 0.333$
r/R	-1.478	$\pm 0.333$
N	0.023	$\pm 0.333$
Q*r/R	0.428	$\pm 0.333$
Q*N	1.563	$\pm 0.333$
r/R*N	-0.944	$\pm 0.333$
Q*r/R*N	2.479	$\pm 0.333$

### 3.4 Optimización de las condiciones de operación para el mezclado térmico.

Del análisis estadístico se obtuvieron ecuaciones sobre la respuesta en el  $\Delta T_{\text{máx}} ec.$  (14) y la eficiencia energética ( $Ef_{\text{Ener}ec.}$  (15)) en función de las tres variables de proceso exploradas, es decir, del flujo de gas, número y posición de inyectores; adicionalmente para realizar la optimización se

emplearon las ecuaciones obtenidas por Manuel Flores sobre la respuesta de la velocidad promedio ( $v_{prom}$ , ec.(11)), la energía cinética turbulenta promedio ( $\kappa_{prom}$  ec.(12)) y el área de ojo ( $A_{ojo}$  ec.(13)) en función de las mismas variables y agregando la variable de espesor de escoria ( $hs$ ). Esto se hizo para optimizar al mismo tiempo el mezclado químico, el mezclado térmico y la apertura del ojo de escoria.

Las ecuaciones mencionadas fueron procesadas con un algoritmo genético de Matlab® que se encarga de filtrar poblaciones de datos con la finalidad de encontrar puntos óptimos, las ecuaciones procesadas se presentan a continuación:

$$\begin{aligned}
 v_{prom} = & 0.025 + 0.0074 Q + 0.049 \frac{r}{R} + 0.006 n + 0.007hs - 0.0048 Q * \frac{r}{R} - 0.0018Q \\
 & * n - 0.0035Q.hs - 0.032 \frac{r}{R} * n - 0.003 \frac{r}{R} * hs - 0.0034 n * hs \\
 & + 0.0048 Q * \frac{r}{R} * n + 0.0031 Q * \frac{r}{R} * hs + 0.0020 Q * n * hs + 0.002 \frac{r}{R} \\
 & * n * hs - 0.0024 Q * \frac{r}{R} * n * hs \\
 & \dots\dots\dots(11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \kappa_{prom} = & 0.0039 + 0.0073 Q + 0.0093 \frac{r}{R} + 0.0047n + 0.0018hs - 0.00112Q * \frac{r}{R} \\
 & - 0.00006 Q * n - 0.00022 Q * hs - 0.0069 \frac{r}{R} * n - 0.0007 \frac{r}{R} * hs \\
 & - 0.00250 n * hs + 0.00100 q * \frac{r}{R} * n + 0.00035 q * \frac{r}{R} * hs + 0.00029Q \\
 & * n * hs + 0.0024 \frac{r}{R} * n * hs - 0.00040Q * \frac{r}{R} * n * hs \\
 & \dots\dots\dots(12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ojo} = & 20.24 + 3.020 Q + 20.85 \frac{r}{R} + 6.31 n + 0.86 Q * \frac{r}{R} - 0.233 Q * n - 16.90 \frac{r}{R} * n \\
 & + 0.654 Q * \frac{r}{R} * n \\
 & \dots\dots\dots(13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{m\acute{a}x} = & 6.333 + 0.5033 Q + 5.892 \frac{r}{R} + 2.334 n - 1.011 Q * \frac{r}{R} - 0.2604 Q * n \\
 & - 4.899 \frac{r}{R} * n + 0.638 Q * \frac{r}{R} * n \\
 & \dots\dots\dots(14)
 \end{aligned}$$

$$E_{f_{Ener}} = 17.60 + 1.859 Q + 21.67 \frac{r}{R} + 7.89 n - 3.75 Q * \frac{r}{R} - 1.114 Q * N - 17.32 \frac{r}{R} * n + 2.656 Q * \frac{r}{R} * n \dots\dots\dots(15)$$

Los puntos óptimos proporcionados por el programa se filtraron y ordenaron con la finalidad de tener coherencia y encontrar cierta tendencia entre los mismos para producir los frentes de Pareto correspondientes.

En primera instancia se presentan los puntos proporcionados para las ecuaciones (14) y (15) en la Tabla 3.4.1 que se encuentran únicamente en función del flujo, la posición y número de inyectores. De los mismos se identifican dos regiones; en la primera el flujo se mantiene prácticamente constante en 1L/min, al igual que dos inyectores, mientras que la posición de inyección desciende desde 4/5 hasta 1/3 del radio, estas condiciones favorecen el incremento de temperatura del baño, mientras que el área de ojo aumenta hasta 32% considerando este valor pequeño en comparación con la otra región. En esta segunda región el flujo aumenta hasta alcanzar los 9L/min mientras que la posición radial y el número de inyectores permanecen fijos en 1/3 del radio y 2 inyectores, en esta región se observa un incremento en la temperatura pero no tan significativo como en la región 1 -donde se incrementa hasta 1.7°C-, en esta región el área de ojo se incrementa hasta 58 %, por lo que estas últimas condiciones propiciarían la oxidación del baño metálico, además de un mayor gasto en el gas Argón con el incremento de flujo. Ambas regiones se señalan en el frente de Pareto de la Figura (3.4.1), considerando únicamente estas variables el punto correspondiente a un flujo de 1L/min, y dos tapones a 1/3 del radio producirían un aumento de temperatura considerable y un área de ojo reducida, dichas condiciones corresponden al Experimento 5.

Tabla 3.4.1. Puntos óptimos para la respuesta en el  $\Delta T$

Q	r/R	n	Aojo (%)	$\Delta T(^{\circ}C)$
1.00	0.80	2.00	26.82	8.07
1.02	0.72	1.98	27.85	8.38
1.06	0.60	2.00	29.14	8.79
1.02	0.46	2.00	30.54	9.31
1.10	0.38	2.00	31.61	9.59
1.09	0.34	2.00	32.03	9.74
1.42	0.34	2.00	33.16	9.78
1.76	0.33	2.00	34.29	9.81
2.48	0.34	1.99	36.61	9.85
3.35	0.33	2.00	39.52	9.93
4.62	0.33	2.00	43.67	10.02
5.40	0.34	1.99	46.23	10.07
6.45	0.34	2.00	49.66	10.15
7.06	0.34	2.00	51.67	10.19
7.93	0.33	2.00	54.54	10.26
8.70	0.33	2.00	57.05	10.31
9.00	0.33	2.00	58.03	10.33

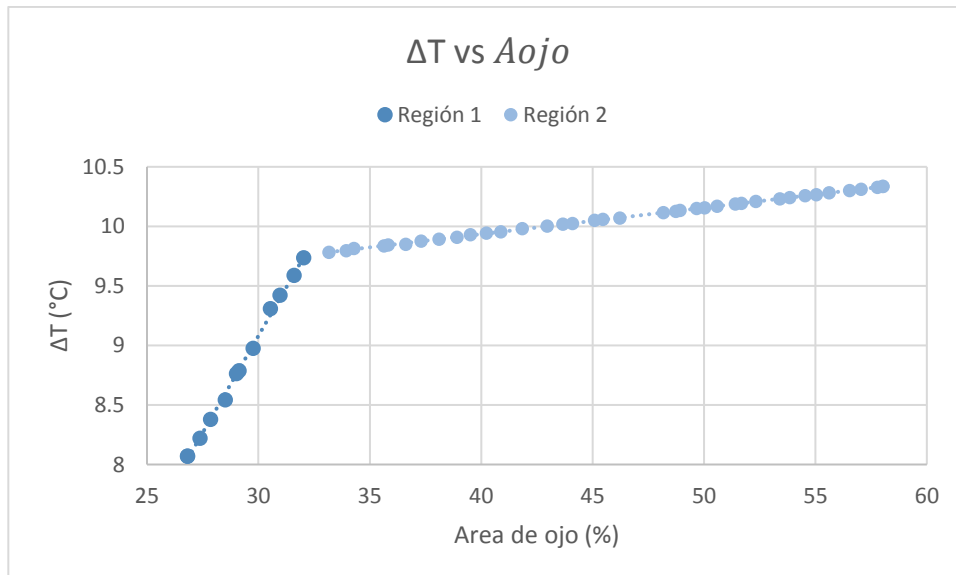


Figura 3.4.1 Frente de Pareto del  $\Delta T$  contra el área de ojo expuesta.

Al contemplar el espesor de escoria como variable adicional, se complementa la información proporcionada por los datos anteriores, esta

vez, se distinguen cinco regiones, cada una de particular interés para el proceso, los puntos proporcionados por el programa se muestran en la Tabla 3.4.2; en la primera el flujo se mantiene constante a 1L/min al igual que el número de tapones -2- así como el espesor de escoria en 1.95 cm, bajo estas condiciones la velocidad del fluido permanece prácticamente constante, pero se sacrifica la energía cinética turbulenta promedio, el área de ojo aumenta aproximadamente hasta 31.74% y el  $\Delta T$  aumenta significativamente -9.7°C- en comparación con las otras regiones, en la olla esto pudiese resultar útil una vez que se han completado los procesos de desulfuración y la remoción de otras impurezas, prácticamente previo a la colada, donde el ajuste de temperatura es primordial para el llenado de moldes; en la segunda región se aumenta ligeramente el flujo del fluido, el número de tapones permanece constante en 2 y la posición radial aumenta de 1/3 a 4/5 del radio, y el espesor de escoria disminuye ligeramente, en estas condiciones de operación aumenta la velocidad y la energía cinética turbulenta, al igual que el área de ojo en aproximadamente 12%, la temperatura aumenta ligeramente en 0.7°C. En la olla este estado puede resultar de utilidad durante los procesos de desulfuración y remoción de impurezas, puesto que la energía cinética turbulenta y la velocidad son auxiliares para el ascenso de estas impurezas y de esta forma se retienen en la capa de escoria, la capa de escoria también contribuye a mantener la temperatura dentro del baño; las regiones 3 y 4 también podrían contribuir en el mezclado químico, puesto que se presenta la mayor velocidad promedio y la energía cinética turbulenta promedio, manteniendo la temperatura por encima de los 9°C. Estas regiones se caracterizaron por el aumento de flujo manteniéndose por encima de los 7L/min, con dos inyectores y un espesor de escoria de en promedio 1.7 cm, variando la posición radial, en el caso de la región 3 el inyector se encuentra a 4/5 del radio, mientras que en la región 4 a 1/3 del radio, sin embargo se debe considerar que en estos casos el área de ojo se incrementa hasta el 60% lo que puede resultar perjudicial en la oxidación del baño metálico, además de un gasto mayor de Argón. En la última región se hace hincapié no sólo en los resultados proporcionados por el programa sino también a las investigaciones de diversos autores como S.Joo[29], J.Mazdal[30], A.Amaro Villeda[26] y Z.Q Liu[31] donde se señala al lugar de inyección con dos tapones a 0.5 del radio como un ideal para el mezclado químico. Para los resultados obtenidos, el flujo varía desde 1L/min hasta 7L/min, la posición de inyección se mantiene constante en 0.5 del radio al igual que los dos inyectores, el espesor con escoria se encuentra por encima de 1.5 cm, y el incremento de temperatura se mantiene por encima de los 9°C, con el aumento de flujo



también se tienen incrementos en la velocidad promedio, la energía cinética turbulenta promedio al igual que el porcentaje de área de ojo, por lo que se recalca nuevamente la consideración de la exposición del baño metálico que puede oxidarse. Los frentes de Pareto mostrados en las Figuras 3.4.2, 3.4.3 y 3.4.4 hacen referencia a lo descrito anteriormente para las regiones señaladas.

Tabla 3.4.2 Puntos óptimos para la respuesta en el  $\Delta T$  con el espesor de escoria como variable adicional.

Q	r/R	N	hs (cm)	V (m/s)	K (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	A ojo (%)	$\Delta T$ (°C)
1.02	0.80	2.00	1.44	0.0330	0.0034	26.89	8.07
1.03	0.75	1.97	1.93	0.0343	0.0033	27.67	8.30
1.01	0.52	1.96	1.47	0.0364	0.0029	29.89	9.08
1.01	0.50	1.94	1.94	0.0372	0.0024	30.16	9.16
1.01	0.48	1.96	1.94	0.0372	0.0023	30.32	9.23
1.01	0.45	1.92	1.94	0.0378	0.0022	30.68	9.33
1.01	0.39	1.92	1.94	0.0384	0.0020	31.28	9.54
1.00	0.35	1.93	1.95	0.0387	0.0018	31.59	9.65
1.00	0.34	1.93	1.95	0.0388	0.0018	31.74	9.70
1.14	0.37	1.93	1.89	0.0392	0.0022	31.88	9.61
1.77	0.40	1.97	1.38	0.0417	0.0037	33.72	9.57
2.79	0.53	1.96	1.49	0.0465	0.0051	36.41	9.27
4.31	0.74	1.96	1.75	0.0539	0.0075	41.38	8.89
4.99	0.80	1.96	1.65	0.0581	0.0085	44.13	8.87
7.02	0.76	2.00	1.73	0.0700	0.0111	52.53	9.33
7.65	0.77	1.95	1.87	0.0733	0.0118	55.41	9.41
8.99	0.80	2.00	1.91	0.0809	0.0139	61.05	9.63
5.20	0.38	1.97	1.48	0.0603	0.0076	45.50	9.93
7.09	0.45	1.98	1.85	0.0702	0.0101	52.09	9.95
8.94	0.34	2.00	1.37	0.0802	0.0121	57.85	10.33
1.01	0.50	1.94	1.94	0.0372	0.0024	30.16	9.16
2.79	0.53	1.96	1.49	0.0465	0.0051	36.41	9.27
7.09	0.45	1.98	1.85	0.0702	0.0101	52.09	9.95

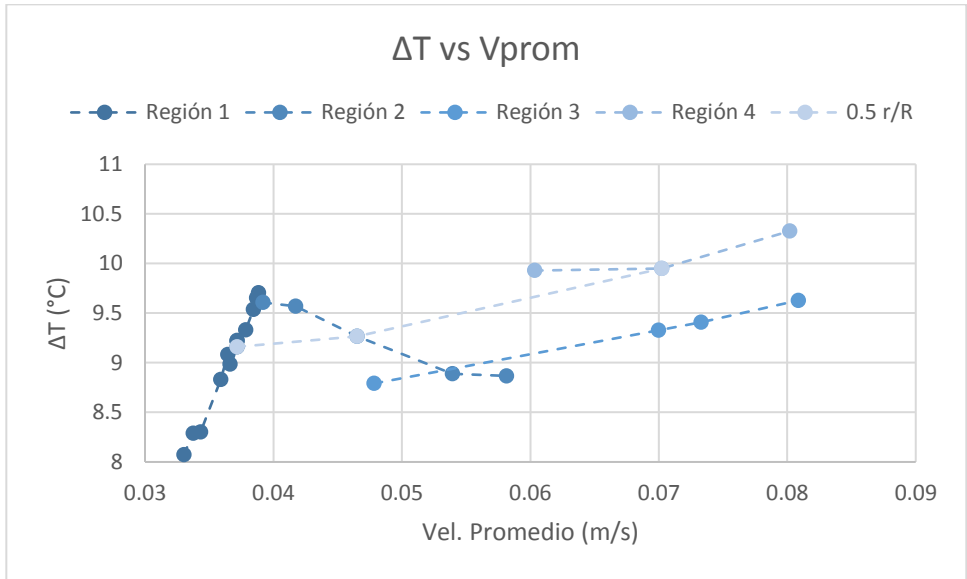


Figura 3.4.2.Frente de Pareto del  $\Delta T$  contra la velocidad promedio

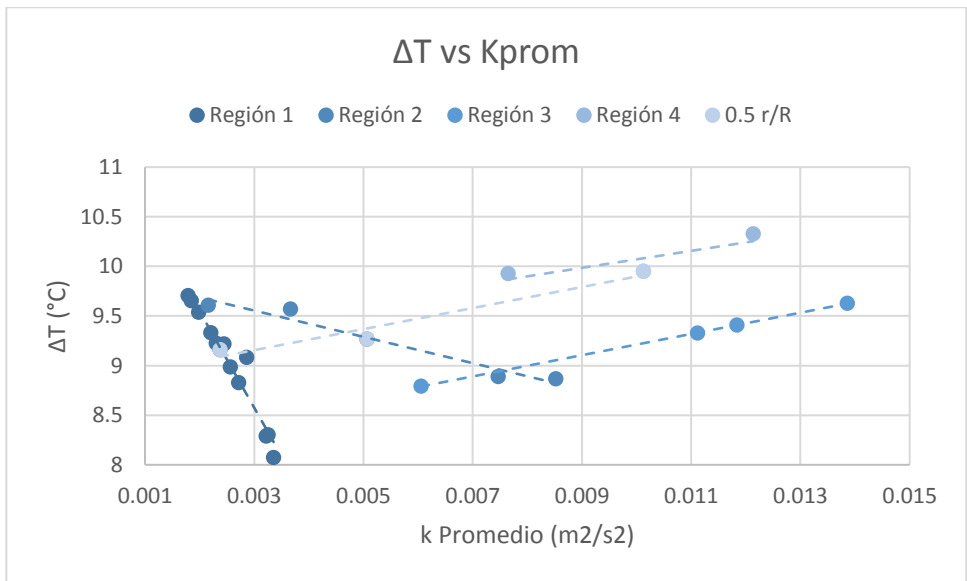
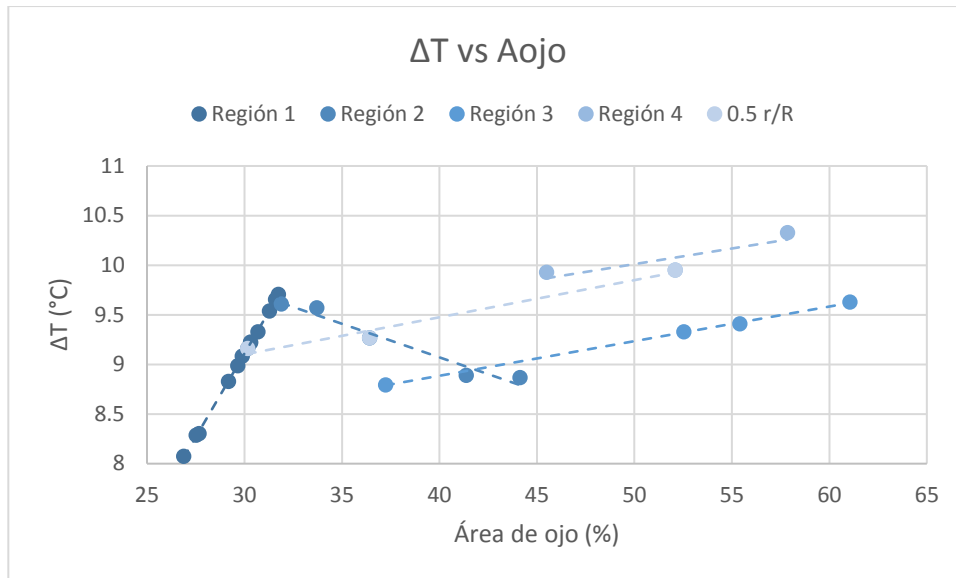


Figura 3.4.3.Frente de Pareto del  $\Delta T$  contra la energía cinética turbulenta promedio



3.4.4 Frente de Pareto del  $\Delta T$  contra el área de ojo expuesta

De manera similar que para el  $\Delta T_{\text{máx}}$ , se obtuvieron los puntos óptimos para la Eficiencia energética, los cuales se presentan en la Tabla 3.4.3, así como los frente de Pareto correspondientes donde se describen 4 regiones; en la primera se mantiene un flujo constante de 1L/min al igual que el número de inyectores, el espesor de escoria se encuentra presente desde 1 hasta 1.9 cm, mientras que la posición radial disminuye hasta 1/3 del radio. Estas condiciones mantienen el área de ojo entre 27 y 31%, mientras que la velocidad del fluido permanece casi constante y la energía cinética turbulenta promedio disminuye, es en esta región donde la eficiencia energética aumenta significativamente respecto a las otras, en la segunda región el flujo aumenta ligeramente junto con el área de ojo, la velocidad y la energía cinética turbulenta promedio, mientras que la posición radial se mantiene en 1/3 del radio al igual que dos inyectores, estas condiciones mantienen prácticamente la eficiencia energética constante en 28%, en las siguientes dos regiones se tienen los flujos más altos por arriba de 6L/min al igual que en el caso de la temperatura, este incremento de flujo favorece el incremento de velocidad y energía cinética turbulenta pero también se aumenta considerablemente el área de ojo exponiendo con ello el baño metálico a oxidarse, mientras que la respuesta en la eficiencia energética aumentó únicamente en un 2% con respecto a la región 2. Los frentes de Pareto mostrados en las Figuras 3.4.5, 3.4.6 y 3.4.7 hacen referencia a lo descrito anteriormente para las regiones señaladas.

Q	r/R	N	hs (cm)	Aojo (%)	V (m/s)	K (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Ef <sub>Ener</sub> (%)
1.0032	0.7988	1.9615	1.0322	27.0812	0.0336	0.0033	24.0914
1.0119	0.6610	1.9553	1.2345	28.5425	0.0351	0.0032	25.6080
1.0074	0.5930	1.9127	1.6022	29.3593	0.0365	0.0029	26.4178
1.0060	0.5729	1.9559	1.0361	29.4025	0.0359	0.0033	26.5504
1.0105	0.5235	1.9070	1.6554	30.0339	0.0373	0.0027	27.1269
1.0144	0.4053	1.9257	1.3172	31.1311	0.0380	0.0028	28.3292
1.0148	0.3766	1.9069	1.9032	31.4072	0.0387	0.0020	28.6014
1.0151	0.3463	1.9043	1.9439	31.6870	0.0390	0.0018	28.9010
1.0175	0.3418	1.9039	1.9481	31.7360	0.0391	0.0018	28.9456
1.1398	0.3766	1.9069	1.9032	31.8284	0.0393	0.0022	28.6302
1.4047	0.3786	1.9355	1.8437	32.7020	0.0404	0.0026	28.7055
2.1348	0.3807	1.9392	1.7859	35.1495	0.0442	0.0036	28.8584
4.1206	0.4359	1.9135	1.0676	41.7063	0.0548	0.0067	28.9666
6.0566	0.7750	1.9859	1.6854	48.5412	0.0643	0.0099	28.4225
6.4450	0.5940	1.9611	1.6380	50.0340	0.0670	0.0097	29.2546
8.4669	0.7788	1.9245	0.6137	59.0354	0.0857	0.0126	30.2671
8.9920	0.7846	1.9929	1.7812	60.9917	0.0817	0.0138	30.8843

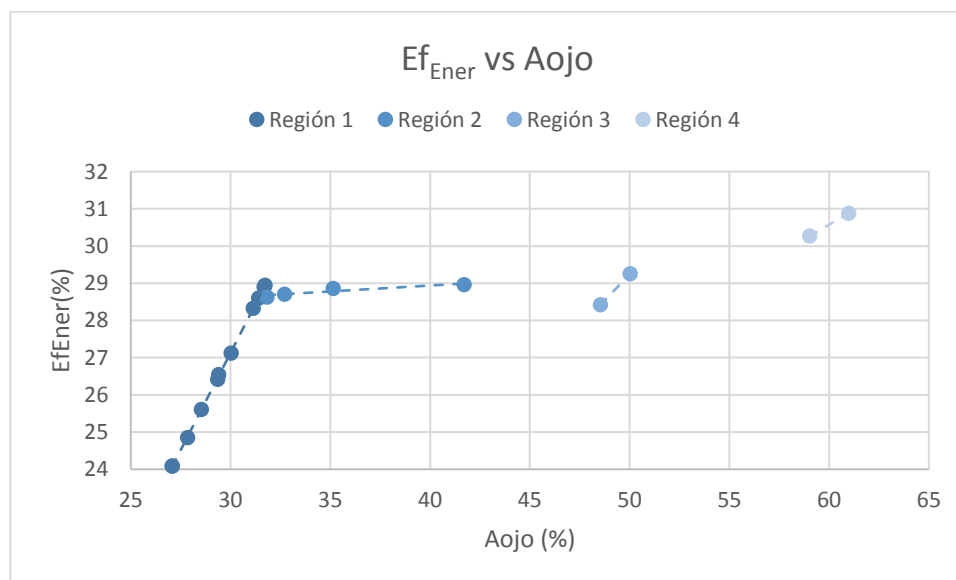


Figura 3.4.5. Frente de Pareto de la eficiencia energética contra el área de ojo expuesta

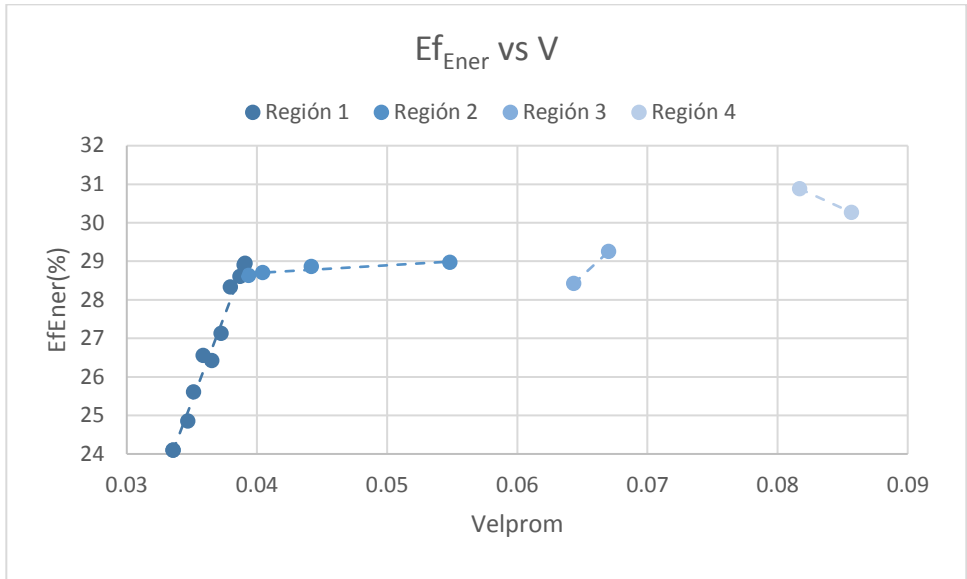


Figura 3.4.6. Frente de Pareto del  $\Delta T$  contra la velocidad promedio

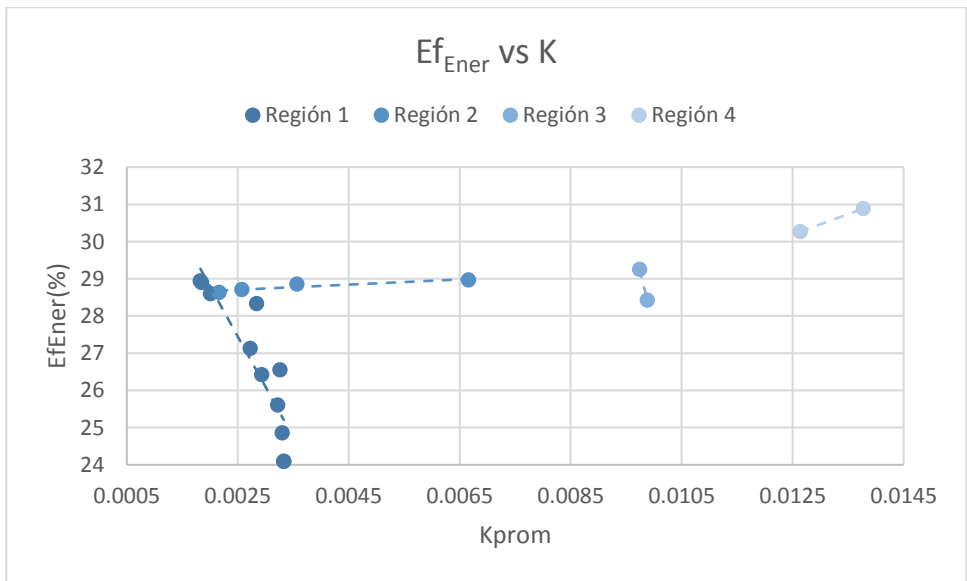


Figura 3.4.7. Frente de Pareto de la eficiencia energética contra la energía cinética turbulenta promedio

### **3.5 Comparación de las condiciones óptimas entre el mezclado químico y térmico.**

Si únicamente se considera la respuesta en el  $\Delta T_{\text{máx}}$  y la eficiencia energética en función de las variables planteadas, la primera se incrementa hasta  $10.33^{\circ}\text{C}$  empleando las condiciones de dos inyectores a  $1/3$  del radio, con un flujo de  $9\text{L}/\text{min}$  y un espesor de escoria de  $1.37\text{ cm}$ , mientras que la eficiencia energética se ve beneficiada empleando dos inyectores a  $4/5$  del radio, con un flujo de  $9\text{L}/\text{min}$  y un espesor de escoria de  $1.78\text{ cm}$  presentando un valor máximo de  $30.8\%$ , sin embargo, para los diversos propósitos en la olla el maximizar estos valores conlleva ciertas deficiencias en las operaciones de mezclado químico, ya que genera un mayor gasto de Argón y se incrementa el área de ojo significativamente propiciando la oxidación del baño metálico. De acuerdo a L.Jardón Pérez[32], las condiciones óptimas para el mezclado químico se disponen en dos inyectores ubicados a  $4/5$  del radio.

Por lo tanto controversial establecer una condición fija de operación para la olla de acero debido al contraste entre las condiciones que favorecen ciertas partes del proceso con respecto a otras.

## 4. Conclusiones

- La construcción y el empleo de una estructura metálica como soporte de tres quemadores de gas butano/propano mostró resultados favorables para la simulación del arco eléctrico en la olla al elevar la temperatura del baño de agua hasta 10°C.
- Demostrar la similitud térmica entre el modelo y la olla agitada resulta controversial, dado que el único criterio reportado en la literatura aplica para condiciones de convección natural aplicado de la transferencia de calor de la olla al ambiente donde se sitúa en un periodo de estadía, por lo que se sugieren estudios en los que se analice el calor transferido a la olla.
- El análisis estadístico presentado demostró que el flujo es la variable más significativa en las respuestas del  $\Delta T_{\text{máx}}$  y la eficiencia energética, presentando un efecto positivo en ambos casos, respaldado con los contornos de PIV, se encontró que la temperatura y la absorción de calor se incrementa conforme se aumenta el flujo de gas.
- La posición de inyección a 1/3 también fue significativa para el aumento de temperatura, demostrando que la cercanía de la inyección de gas y de suministro de calor, favorecen el mezclado térmico.
- La optimización señala las condiciones de dos inyectores a 1/3 del radio, con un flujo de 9L/min y un espesor de escoria de 1.37 cm sobresalientes para elevar la temperatura del sistema hasta en 10.33°C. Mientras que la eficiencia energética se ve beneficiada empleando dos inyectores a 4/5 del radio, con un flujo de 9L/min y un espesor de escoria de 1.78 cm presentando un valor máximo de 30.8%.
- Dado el carácter multifuncional en el horno olla, es inviable establecer una única condición de operación óptima, ya que el favorecer las respuestas en el mezclado térmico comprometen las respuestas en el mezclado químico, por ejemplo, un aumento de flujo propicia un aumento del área de ojo, propiciando la oxidación del metal con ello.

- Al comparar las condiciones óptimas para el mezclado químico reportadas en la literatura con lo descrito en el presente trabajo se verificó el contraste con las condiciones óptimas para el mezclado térmico, si bien dos inyectores favorecen ambos procesos, la posición de los mismos es la variable que resalta entre ambos, a  $1/3$  del radio se favorece el incremento de temperatura en la olla, mientras que a  $4/5$  del radio se promueve una menor área de ojo y consecuentemente una disminución en la oxidación del metal.



## 5. Bibliografía

- [1] Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero, <CANACERO>, 2019. [En línea]. Disponible: [https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/info-grafia\\_canacero\\_2019.pdf](https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/info-grafia_canacero_2019.pdf) [Último acceso: 4 de mayo de 2020]
- [2] World Steel Association AISBL, <World Steel>, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.worldsteel.org/steelstory/>. [Último acceso 4 de mayo de 2020]
- [3] Castro Sedano David, Hernández Velázquez Marcelo, de Apuntes Sobre Siderurgia I, México, Instituto Politécnico Nacional, 1999, pp. 6-7, 123-131.
- [4] Asociación Latinoamericana del Acero, <ALACERO>, 2020. [En línea]. Disponible: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/proceso-siderurgico> [Último acceso 4 de mayo de 2020]
- [5] James C. Simmons, <American Iron and Steel Institute>, 2015. [En línea]. Disponible: [https://www.steel.org/~media/Files/AISI/Making%20Steel/Article%20Files/learning\\_2ndrefining.pdf](https://www.steel.org/~media/Files/AISI/Making%20Steel/Article%20Files/learning_2ndrefining.pdf) [Último acceso 4 de mayo de 2020]
- [6] Kumar Harikesh, <Ladle Refining Furnace>, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.hkdivedi.com/2015/02/ladle-refining-furnace.html> [Último acceso 5 de mayo de 2020]
- [7] Mazumdar Dipak, Guthrie Roderick, <<The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems>> ISIJ International, Vol. 35, No. 1, pp.1-20, 1995.
- [8] Castillejos and J. K. Brimacombe, << Measurement of physical characteristics of bubbles in gas-liquid plumes: Part II. Local properties of turbulent air-water plumes in vertically injected jets>> Metallurgical Transactions B, Vol. 18, pp. 659-671, 1987.
- [9] S. T. Johansen, D. G. C. Robertson, K. Wojeand T. A. Engh, <<Fluid dynamics in bubble stirred ladles: Part I. experiments>> Metallurgical Transactions B, Vol. 19, pp. 745-754, 1989.
- [10] S. Tanaka, R. I. L. Guthrie, <<Mathematical modeling of flows in large tundish systems in steelmaking>> Process Technology Proc., 6th Int. Iron Steel Cong., Vol. 6, pp. 249, 1986.

- [11] J. Mietz, F. Oeters, <<Fluid flow and mixing in secondary metallurgy>> Steel Res., Vol. 59, pp. 52, 1988.
- [12] O. Haida, J. K. Brimacombe, <<Physical-model study of the effect of gas kinetic Energy in injection refining processes>>, ISIJ International, Vol. 25, pp. 14-19, 1985.
- [13] Kim, S., Fruehan, R.J. <<Physical modeling of liquid/liquid mass transfer in gas stirred ladles>>. Metallurgical Transactions B, Vol. 18, pp. 381-390, 1987.
- [14] S. Taniguchi, Y. Okada. A. Sakai , A. Kikuchi, <<Spout Eye Area in Ladle Refining Process>> Proc. 6th Int. Iron Steel Cong., ISIJ, Tokyo, pp. 394, 1990.
- [15] Szekely, J., Dilawari, A.H. & Metz, R. <<The mathematical and physical modeling of turbulent recirculating flows>>. Metallurgical Transactions B , Vol. 10, pp. 33-41, 1979.
- [16] Sahai, Y., Guthrie, R.I.L. Hydrodynamics of gas stirred melts: Part I. Gas/liquid coupling, Metallurgical Transactions B, Vol. 13, pp. 193-202, 1982.
- [17] Johansen, S.T., Boysan, <<F. Fluid dynamics in bubble stirred ladles: Part II. Mathematical modeling>>. Metallurgical Transactions B, Vol. 19, pp. 755-764, 1988.
- [18] Mazumdar, J.W. Evans, <<Macroscopic models for gas stirred ladles>>. ISIJ Internationalm Vol. 44, No. 3, pp. 447-461, 2004.
- [19] Mazumdar, D. <<Dynamic similarity considerations in gas-stirred ladle systems>> Metallurgical Transactions B, Vol. 21, pp. 925-928, 1990.
- [20] D. Mazumdar, H. B. Kim and R. I. L. Guthrie, <<Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study>>, Ironmaking Steelmaking, Vol. 27, pp. 302, 2000.
- [21] Y. Pan, B. Bjorkman, << Numerical Analysis on the Similarity between Steel Ladles and Hot-water Models Regarding Natural Convection Phenomena>>, ISIJ International, Vol. 42, pp. 53, 2002.

[22] Yonezawa, K., Schwerdtfeger, K., << Spout eyes formed by an emerging gas plume at the surface of a slag-covered metal melt>>, *Metallurgical and Material Transactions B*, Vol. 30, pp. 411–418, 1999.

[23] Ahindra Ghosh, <<Review of our investigations on ladle furnace>>, *The Indian Institute of Metals*, Vol.70, pp. 443-452, 2017.

[24] Gómez Rodríguez Ana Luisa, << Implementación experimental de la técnica PLIF térmica en ollas agitadas con gas>>, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

[25] Dantec Dynamics, <<Dantec Dynamics>>, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-induced-fluorescence/> [Último acceso 6 de mayo de 2020]

[26] Amaro Villeda, Ramírez Argáez, A.N. Conejo, <<Effect of Slag Properties on Mixing Phenomena in Gas-stirred Ladles by Physical Modeling>>, *ISIJ International*, Vol. 54, No. 1, pp. 1–8, 2004.

[27] Sigma-Aldrich, <<Sigma-Aldrich>>, 2020. [En línea]. Disponible: [https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/r6626?lang=es&region=MX&gclid=CjwKCAiAvonyBRB7EiwAadauqZvFEZKgItiahQFxyBT4CGDR64wwdashHzjm5ICqshR\\_0kXpKXGxB9xoc9yEQAvD\\_BwE](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/r6626?lang=es&region=MX&gclid=CjwKCAiAvonyBRB7EiwAadauqZvFEZKgItiahQFxyBT4CGDR64wwdashHzjm5ICqshR_0kXpKXGxB9xoc9yEQAvD_BwE) [Último acceso 6 de mayo de 2020]

[28] Flores García Manuel Alejandro, <<Efecto de la posición y número de tapones, flujo de gas y de la capa de escoria sobre la fluido dinámica de una olla >>, México, Universidad Nacional Autónoma de México.

[29] Joo, S., Guthrie, R.I.L. <<Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single- and dual-plug bubbling operations>>. *Metall Mater Trans B* 23, 765–778 (1992).

[30] Mandal, J., Patil, S., Madan, <<M. et al. Mixing time and correlation for ladles stirred with dual porous plugs>>. *Metall Mater Trans B* **36**, 479–487 (2005).

[31] Z.Q Liu << Modeling of Gas-Steel-Slag Three-Phase Flow in Ladle Metallurgy: Part I. Physical Modeling, ISIJ International, Vol. 57 (2017), No. 11, pp. 1971–1979.

[32] Luis Enrique Jardón Pérez, Adrián Amaro-Villeda, A. N. Conejo, Carlos González-Rivera & Marco A. Ramírez-Argáez <<Optimizing gas stirred ladles by physical modeling and PIV measurements>>, *Materials and Manufacturing Processes*, Volumen 33(2018), pp.882-890.

[33] Jardón-Pérez, L.E., Amaro-Villeda, A.M., Trápaga-Martínez, G., González-Rivera, C., Ramírez-Argáez, M.A., <<Utilization of the Planar Laser-Induced Fluorescence Technique (PLIF) to Measure Temperature Fields in a Gas-Stirred Ladle>> (2020) *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 51 (6), pp. 2510-2521.

## Apéndice A. Relatoría de las acciones correctivas en la implementación de la técnica PLIF térmica.

La implementación de la técnica PLIF térmico aplicada a ollas agitadas con gas no había sido reportada previamente en la literatura. Por esta razón, no existe referencia detallada que ayude a implementarla de manera sistemática. En esta sección se describirá a detalle y a manera de recuento cronológico todas las acciones, correcciones y cambios que se realizaron durante el desarrollo de este trabajo para llegar al estado actual de la técnica PLIF en nuestro laboratorio, el cual es robusto y reproducible.

Paralelamente a este proyecto, se realizó un proyecto en el cual se estudiaba el mezclado térmico mediante modelado físico y matemático, en donde el modelo físico tiene una escala 1/17 y también se realizó una tesis de licenciatura implementando la técnica PLIF térmico en ese mismo modelo físico. Este proyecto emplea un modelo de mayor tamaño (escala 1/6) por lo que de manera lógica se comenzó a trabajar en el modelo 1/17 en el grupo. Por eso a continuación se describe esa relatoría en el modelo pequeño, y luego se detallan las acciones tomadas en el modelo de mayor escala.

### Modelo pequeño

#### a. Cambio de láser, óptica y posición del láser.

El primer imponderable que se presentó en el desarrollo del proyecto fue la falla de una de las fuentes láser del sistema PIV DANTEC DYNAMICS®. Este evento representó un retraso considerable en el desarrollo del proyecto e incluso se pensó en su cancelación. La solución a este problema fue la adquisición en septiembre de 2019, de una fuente láser de menor potencia mostrada en la Figura A.1 marca DPSS con una potencia de 20 W y una longitud de onda de 532nm (verde). Sin embargo, esta fuente no contaba con la óptica adecuada para generar una hoja de luz láser uniforme, por lo que se tuvo que comprar una lente cilíndrica 5x11 mm (ver Figura A.2), que se adaptó a la fuente láser y con la cual se pudo obtener una hoja de luz láser más homogénea con la que se pudo trabajar.



Figura A.1 Fuente láser DPSS

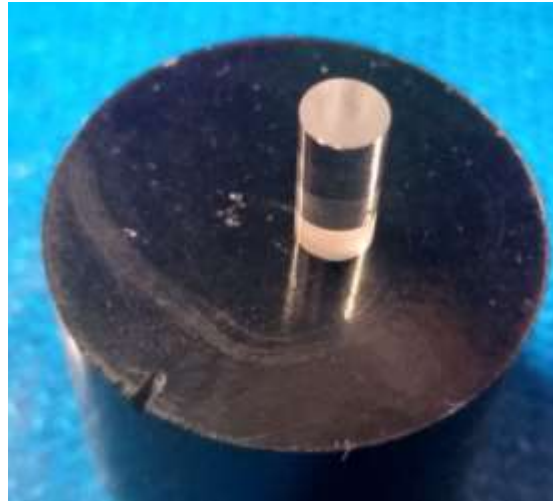


Figura A.2 Lente cilíndrica  
5x11mm

Finalmente, se ajustó la disposición de la cabeza láser para evitar el ruido ocasionado por reflejos en la superficie libre debido a la naturaleza óptica de la técnica y a la sensibilidad que presenta la misma. Corrigiendo de esta manera un error que se presentaba en la lectura de temperaturas.

b. Cambio de concentraciones de rodamina B.

Debido al cambio de potencia en la cabeza láser se tuvo la necesidad de ajustar la concentración de rodamina con el fin de cuantificar adecuadamente los cambios en temperatura. Una de las necesidades de la técnica es poder discernir claramente el brillo producto de la fluorescencia de la rodamina a diferentes temperaturas, por lo que se requiere detectar una suficiente emisión de luz y por ende al disminuir la potencia del láser fue necesario incrementar la concentración del trazador. Esto implicó recalcular las concentraciones de rodamina B a ser utilizadas. Se hizo un análisis de sensibilidad de fluorescencia en función de la concentración de rodamina B la cual se muestra en la Figura A.3.

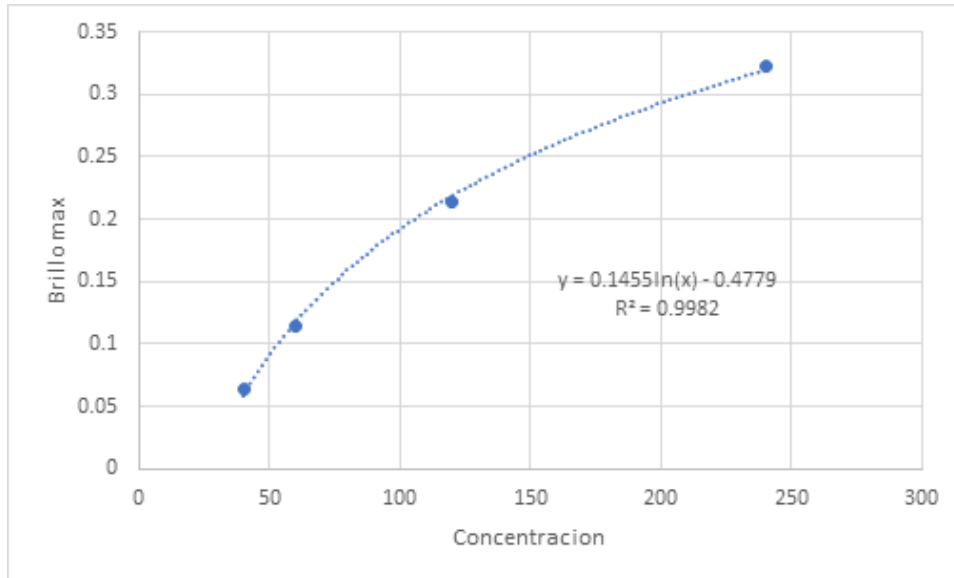


Figura A.3. Brillo máximo en función de concentración rodamina B

De la Figura A.3 se concluyó que la concentración a utilizar es de 200 ppb

- c. Fabricación de un quemador y ajuste de su posición con respecto a la superficie de las soluciones.

Simular el calentamiento del acero en una olla agitada con gas industrial, implica la simulación de arcos eléctricos, los cuales son los responsables de mantener el acero líquido y caliente. Se optó para simular estos arcos usar quemadores de gas butano/propano usando una flama proveniente de una boquilla comercial ver Figura A.4



Figura A.4 Boquilla comercial cobre

Por seguridad se usaron cartuchos marca linmex de 275 g los cuales sólo pueden operar de manera vertical por lo que hubo que construir un sistema de inyección de gas desde el cartucho hacia la boquilla. Además se tuvo que optimizar la distancia entre la boquilla y la superficie del agua

y evitar intermitencias en la flama por falta de oxígeno y para asegurar reproducibilidad experimental.

d. Cambio de regresión lineal a ajuste cuadrático en el código.

La relación brillo del trazador en función de la temperatura resultó no lineal, por lo que se optó por un ajuste cuadrático programado en el código Matlab ® para representar esta relación.

e. Ajuste de termopares, implementación de tapa/soporte.

Al no tener una referencia previa del uso de la técnica PLIF para medir temperatura en ollas agitadas con gas, se requiere validarla, por lo cual se debe comparar con un método de medición probado, en este caso se optó por el uso de termopares tipo K. Esto conlleva la instrumentación del modelo con los termopares conectados a un sistema de adquisición de datos y la comparación de las temperaturas obtenidas de manera puntual con los mismos contra la temperatura medida con la nueva técnica. Esta instrumentación presentó ciertos inconvenientes durante la operación del modelo ya que los termopares se movían caprichosamente durante el burbujeo de gas, impidiendo una comparación exitosa entre lo registrado por el PLIF térmico y la lectura de los termopares. Como ejemplo de la validación no exitosa de la técnica PLIF térmico se presenta en la Figura A.5, en donde la sustancial diferencia entre las temperaturas registradas por un termopar y la técnica PLIF es evidente.

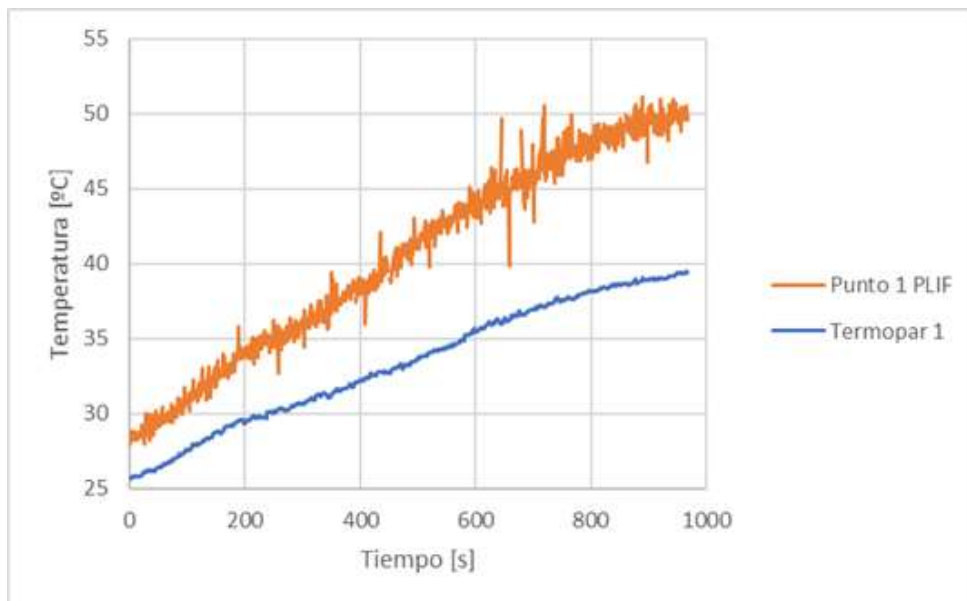


Figura A.5 Temperatura en función del tiempo, comparativa entre la técnica de PLIF térmico y el registro del termopar 1.



Esto se corrigió construyendo un soporte para los termopares y el quemador, que se muestra en la Figura A.6. La validación exitosa de la técnica PLIF térmico se presenta en la Figura A.7



Figura A.6. Dispositivo implementado para el soporte de termopares y quemador en el modelo 1/17.

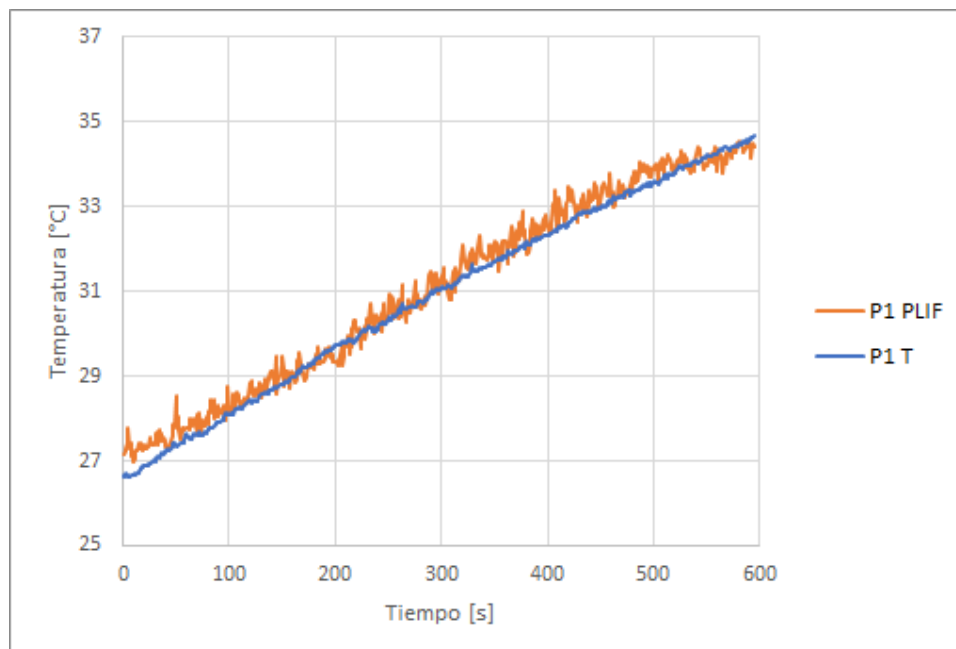


Figura A.7 Temperatura en función del tiempo, comparativa entre la técnica de PLIF térmico y el registro del termopar 1

f. Posiciones fijas para modelo, cámara, termopares y láser.

Debido a la sensibilidad óptica de la técnica, fueron varios los experimentos no exitosos para la validación de la técnica PLIF térmica, a pesar de la corrección de los puntos señalados previamente. Por eso, se decidió realizar un experimento bajo supervisión de los asesores del tema donde se notó que la causa de las desviaciones presentadas entre la lectura de los termopares y lo obtenido mediante la técnica era debido a los movimientos indeseados en cámara, fuente láser y/o modelo físico. La solución a este inconveniente fue fijar de manera permanente la posición relativa de estos tres componentes.

g. Calibraciones por triplicado y con quemadores encendidos.

Finalmente, se pudieron obtener validaciones exitosas entre la técnica PLIF térmico y la lectura de los termopares en el modelo 1/17 calibrando por triplicado y evitando que se ahogara la flama del quemador para lo cual se encendía la flama previamente al experimento manteniendo caliente la boquilla.

Modelo grande

a. Preparación de soluciones de rodamina

El cambio de la escala en el modelo de 1/17 involucró la preparación y manejo de mayor solución, ya que en el modelo pequeño se utilizan 4.5 L de solución, mientras que en el de 1/6 se emplean 80 L. Esto requirió la adquisición de agua destilada y de bidones para su almacenamiento, así como la preparación de 120 L de solución con la misma concentración ver Figura A.8.



Figura A.8 Bidones para almacenamiento agua destilada y solución de rodamina B

b. Cambio de 1 quemador a 3 y ajustar la posición de los mismos con respecto a la superficie de la solución

Nuevamente, dada la enorme cantidad de agua a calentar en el modelo 1/6 en comparación al modelo 1/17 se optó por emplear tres quemadores, en lugar de uno sólo, como se empleaba en el modelo 1/17. Además, el empleo de los tres quemadores posicionados sobre la superficie libre, simulan de mejor manera la delta de electrodos de grafito que generan los arcos eléctricos en ollas de acero industrial.

El uso de un solo quemador no elevaría la temperatura del agua lo suficiente para ser detectada por la técnica PLIF térmico. Por lo que se hace indispensable la implementación de los tres quemadores. Tomando en cuenta la experiencia previa con el modelo 1/17 se decidió fijar la posición de los quemadores con un dispositivo semejante al empleado en el modelo pequeño el cual se ilustra en la Figura A.9 el cual incluye el sistema de inyección de gas.



Figura A.9 Tapa implementada para la alineación y soporte de quemadores.

### c. Quemadores desoldados

El problema más grave que presentó la operación del calentamiento en el modelo 1/6 fue que las boquillas sólo duraban operando unos cuantos minutos, después de lo cual se fundía la soldadura que unía la boquilla con el tubo de cobre que va conectado con el cartucho de gas. En una primera instancia se pensó resolver este problema cubriendo la soldadura con refractario aislante y exteriormente con una cinta de fibra de vidrio, lo cual no resultó. El siguiente intento consistió en aumentar el espesor del moldeable, añadiendo colcha térmica entre el moldeable y la cinta de fibra de vidrio, pero tampoco funcionó. Finalmente, gracias a la ayuda del

Doctor Adrián Amaro Villeda se terminó el problema cambiando las uniones soldadas por piezas de acero, como se muestra en la Figura A.10



Figura A.10 Uniones de acero en los quemadores.

d. Estandarización de la fuente de combustible

En el modelo 1/17 la operación de calentamiento fue de 10 minutos y se eleva la temperatura  $10^{\circ}\text{C}$  aproximadamente con un quemador, operando con una flama moderada, consumiendo aproximadamente 15 g de gas por experimento. Por el contrario el calentamiento del modelo 1/6 con tres quemadores sólo logró elevar  $4^{\circ}\text{C}$  en el mismo periodo de tiempo. Por eso se decidió operar con cartuchos nuevos con válvulas abiertas al 100% durante 20 minutos de operación, elevando con esto la temperatura  $9^{\circ}\text{C}$ , pero consumiendo una cantidad de 240 g de gas con los tres quemadores nuevos.

e. Preenfriamiento de solución excedente con hielo para atemperar la solución post-calibración.

Con el modelo 1/17 en su temperatura más elevada al final de un experimento se regresaba a temperatura ambiente usando bolsas de hielo, lo cual se lograba en aproximadamente en 1 hora, ya que se disminuyen  $9^{\circ}\text{C}$  a 4.5 L de disolución. El modelo 1/16 contiene 80L a enfriar igualmente  $9^{\circ}\text{C}$ , por lo que el uso de las bolsas de hielo resultó insuficiente. Por esto se optó por vaciar la mitad del volumen del modelo y mezclarlo con solución previamente enfriada, disminuyendo así la temperatura en mucho menos tiempo.

## Lista de símbolos/abreviaturas

BF	Alto Horno	$A_{ojo}$	Área de ojo (%)
FDR	Horno de reducción directa	$\nu$	Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )
C	Carbón	$\mu$	Viscosidad dinámica ( $N.s/m^2$ )
CO	Monóxido de carbono	$Q_m$	Flujo en el modelo (L/min)
BOF	Horno básico de oxígeno	$Q_{f.s}$	Flujo en modelo real (L/min)
HAE	Horno de arco eléctrico	T	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
HO	Horno olla	t	Tiempo(s)
$Fr_M$	Número de Froude modificado $= \frac{\rho L^4}{t^2}$	r/R	Posición de inyectores
$\tau_M$	Tiempo de mezclado (s)	n	Número de inyectores
$\epsilon_m$	Energía potencial (J)	$\Delta T_{m\acute{a}x}$	Diferencia máxima de temperatura ( $^{\circ}C$ )
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	$E_{fener}$	Eficiencia energética(%)
NaOH	Hidróxido de sodio	$k_{prom}$	Energía cinética turbulenta promedio( $m^2/s^2$ )
$N_{FrL}$	Número de Froude "de la olla" $= \frac{U_p^2}{gL}$	Hs	Espesor de escoria (cm)
$U_p$	Velocidad de la pluma (m/s)	$v_{prom}$	Velocidad promedio (m/s)
g	Constante de gravedad ( $9.81m/s^2$ )	$\rho$	Densidad( $kg/m^3$ )
L	Altura baño en la olla(m)		
Q	Flujo (L/min)		
R	Radio de la olla (m)		
$\lambda$	Factor de escala		
$\beta$	Coefficiente de expansión térmica ( $1/C^{\circ}$ )		
$\Delta T$	Diferencia de temperatura ( $^{\circ}C$ )		
PMMA	Polimetilmetacrilato		