



Artículo de Investigación

Efecto de la inyección diferenciada sobre la dinámica de fluidos y el mezclado en hornos olla usando las técnicas PIV y PLIF

Effect of differential injection on fluid dynamics and mixing in ladle furnaces using PIV and PLIF techniques

Autor de Correspondencia

L. E. Jardón-Pérez^{1,2}
dregwar@gmail.com

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

²CINVESTAV-Unidad Querétaro
Querétaro México

R. Villarreal-Medina¹
L. E. Jardón-Pérez^{1,2}
C. González-Rivera¹
L. G. Trápaga-Martínez²
M. A. Ramírez-Argáez¹

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

²CINVESTAV-Unidad Querétaro
Querétaro, México²

Artículo Recibido: 5 de diciembre, 2024
Artículo Aceptado: 19 de marzo, 2025
Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



RESUMEN

Se estudio la dinámica de fluidos y el mezclado dentro de un horno olla con un modelo de acrílico, usando agua y aceite de motor para representar el acero líquido y la escoria, respectivamente. Se inyectó aire simulando la inyección de argón industrial en dos puntos, variando el ángulo de separación (90° y 180°) y la proporción de flujo (50/50 y 75/25). Se utilizaron las técnicas de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) y Fluorescencia Planar Inducida por Laser (PLIF) para medir los patrones de flujo y los tiempos de mezclado. Los experimentos mostraron que el modo de inyección diferenciada (75/25) reduce el tiempo de mezclado en comparación con el modo igualado (50/50), especialmente cuando los tapones se encuentran a 90°. Los tiempos de mezclado disminuyeron debido a la reducción de las zonas de baja velocidad. La sinergia entre las técnicas PIV y PLIF permite explorar a detalle los mecanismos de mezclado y el comportamiento del flujo dentro del modelo de la olla.

Palabras clave: Horno Olla, PIV, PLIF, Modelado Físico

ABSTRACT

Fluid dynamics and mixing within a ladle furnace were studied using an acrylic model, employing water and motor oil to represent liquid steel and slag, respectively. Air was injected through two points (or plugs) to simulate industrial argon injection, varying the separation angle (90° and 180°) and the flow rate ratio (50/50 and 75/25). Particle Image Velocimetry (PIV) and Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) techniques were utilized to measure flow patterns and mixing times. The experiments showed that the differential injection mode (75/25) reduces mixing time compared to the balanced mode (50/50), particularly when the plugs are positioned at a 90° separation angle. Mixing times decreased due to the reduction of low-velocity zones. The synergy between PIV and PLIF techniques allows for detailed exploration of mixing mechanisms and flow behavior within the ladle model.

Keywords: Ladle furnace; PIV; PLIF; Physical modeling

Introducción

La refinación secundaria del acero es un paso esencial para su proceso de fabricación. En la mayoría de los casos, la refinación secundaria se realiza en un horno olla. En dicho reactor se presentan tres fases principales: el acero fundido, una capa de escoria fundida que flota sobre el acero y un gas inerte que se inyecta a través de tapones porosos, casi siempre argón grado industrial. Durante este proceso de refinación el acero se desulfura, se remueven los gases disueltos, se ajusta la composición química, se remueven y/o modifican inclusiones y se homogeniza tanto en composición como térmicamente. Todo esto con el objetivo de la aleación final cumpla con las características especificadas por el cliente o por la norma correspondiente.

Los objetivos de la refinación secundaria están gobernados por fenómenos de transporte (transporte de energía, momentum, especies química) por lo que para acelerar la rapidez del proceso se requiere que el baño de metal líquido tenga un correcto grado de agitación. Para cuantificar la eficacia del mezclado en la olla se emplea como indicador el tiempo de mezclado, τ_{mix} , el cual depende de las condiciones de operación y de diseño de dicho reactor. El flujo de gas inyectado, la posición y número de tapones porosos y la relación de diámetro/altura de la olla son algunas de las variables que modifican drásticamente el tiempo de mezclado. La posición de los tapones puede variar en dirección radial (r) y se puede cambiar el ángulo entre los tapones, θ , cuando hay más de uno. Recientemente, en olla con múltiples tapones se ha estudiado el modo de inyección, el cual puede ser igualado o diferenciado. Igualado quiere decir de la proporción de gas inyectado es igual en todos los tapones, mientras que diferenciado implica que la proporción del flujo es diferente en cada tapón.

El efecto de la posición del tapón sobre el tiempo de mezclado ha sido estudiado extensamente. Para el caso de inyección de gas inerte usando flujo igualado en dos tapones, el menor tiempo de mezclado se consigue situando los tapones a la mitad del radio de la olla y separados 180° entre sí. (Amaro-Villeda et al., 2012; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019). Los estudios disponibles muestran que cuando se cambia la posición y ángulo de separación de los tapones porosos,

dejando fijo el modo de inyección se puede encontrar una condición óptima de tiempo de mezclado; pero cuando se modifica el modo de inyección dejando fija la posición y grado de separación, algunas veces aumenta y en otras disminuye el tiempo de mezclado, sin tener una tendencia clara (Chattopadhyay et al., 2009; Liu et al., 2011; Haiyan et al., 2016; Conejo et al., 2019).

Estudiar un sistema siderúrgico, como es el horno de refinación secundaria, acarrea retos importantes, las mediciones que se pueden hacer en planta son limitadas por la temperatura y opacidad del baño. En los casos que se usan simulaciones numéricas, estas no siempre alcanzan a capturar las complejas interacciones que suceden entre las plumas que se forman dentro del reactor (Liu et al., 2011; Haiyan et al., 2016; Conejo et al., 2019), mientras que cuando se llevan a cabo estudios del tiempo de mezclado usando modelos físicos de la olla (Chattopadhyay et al., 2009; Amaro-Villeda et al., 2012; Haiyan et al., 2016; Liu et al., 2017; Conejo et al., 2019), las limitaciones de las técnicas intrusivas utilizadas tradicionalmente, como pH-metría o conductimetría, solo arrojan poca información de la fluidodinámica de la olla. Sin embargo, existen técnicas experimentales no intrusivas que pueden ayudar a comprender que es lo que sucede durante la dispersión de solutos dentro de la olla. Por ejemplo, la Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) permite observar visualmente la dispersión de un trazador en un plano completo de un modelo físico de la olla, y con ello calcular tiempos de mezclado en todo un plano del sistema, además de permitir obtener contornos de concentración instantánea para analizar el mezclado en la misma, y que recientemente se ha implementado exitosamente para estudiar modelos físicos de ollas agitadas por gas (Jardon Perez et al., 2018; Jardon Perez et al., 2019a; Jardon Perez et al., 2019b; Thaker et al., 2020). Por otro lado, la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) se puede usar para medir la fluidodinámica experimental de un modelo físico, permitiendo obtener mapas con la velocidad y turbulencia en un plano completo del sistema. En conjunto, ambas técnicas permiten obtener de una forma sistemática, no intrusiva y con una similitud rigurosa al sistema industrial, como se comparten los distintos mecanismos de mezclado dentro de la olla.

En este trabajo emplean las técnicas PIV y PLIF para estudiar el efecto de la posición de los tapones y el modo de inyección de gas sobre el mezclado de un reactor de refinación secundaria. El estudio se llevó a cabo utilizando un modelo físico de una olla de aceración, con dos tapones colocados a $0.8R$. Los dos ángulos de separación considerados son 90° y 180° , mientras que los modos de inyección de gas considerados fueron 50/50 (flujo igualado) y 75/25 (flujo diferenciado). Los resultados incluyen el cálculo de los tiempos de mezclado, los contornos de concentración instantánea usando la técnica PLIF y los patrones de flujo obtenidos usando la técnica PIV. Se demostró que el uso de inyección diferenciada disminuye los tiempos de mezclado ya que promueve que existan menos zonas muertas dentro de la olla.

Procedimiento Experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un modelo físico cilíndrico hecho de acrílico, con un radio interior (R) de 0.093 m y una altura de 0.214 m , este modelo a escala $1/17$ representa un horno olla de 200 toneladas. Se utilizó agua a temperatura ambiente como un material similar al acero ya que su viscosidad cinemática es muy cercana a la del acero a 1600°C . La escoria se simuló usando aceite de motor por representarla de manera adecuada sin emulsionarse (Liu *et al.*, 2017). El recipiente cilíndrico se llenó de agua destilada hasta una altura del baño (H_b) de 0.17 m . Se añadió aceite de motor suficiente para formar una capa del 5% de la altura total del líquido en el modelo, simulando el espesor de la escoria (H_s). Para evitar las aberraciones ópticas, el cilindro está inmerso en una caja de acrílico que se llena con agua suficiente para rebasar el nivel de agua del cilindro interior. Este paso es importante para una correcta medición con las técnicas PIV y PLIF. La inyección de argón, usada en el proceso a escala industrial, fue sustituida por inyección de aire en el modelo físico. Los dos puntos de inyección fueron colocados a $0.8R$, que es la posición óptima reportada por Jardón-Pérez *et al.* (2018). El primer tapón está colocado en un plano que cruza el centro del modelo de acrílico y es paralelo a una de las caras de la caja de acrílico, como se ve en la Figura N° 1. El segundo tapón tiene un ángulo de separación con respecto al primero de 90° o 180° , que son los dos ángulos utilizados en este trabajo. El flujo de gas utilizado es de 1.54 L min^{-1} , que satisface el criterio de similitud dinámica reportado por Jardón-Pérez *et al.* (2019a). El flujo de gas total es inyectado en los dos modos de inyección, igualado y diferenciado. Cuando se usa el modo igualado, el flujo de gas se divide en una proporción 50/50 en cada punto de inyección, mientras que, para el flujo

diferenciado, la proporción es de 75/25, el tapón con mayor cantidad de flujo es el tapón 1. El flujo de gas inyectado se controló usando un flujómetro ColeParmer® conectado a un compresor neumático marca Powermate®.

Para obtener los patrones de flujo se usó la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). Se seleccionaron dos planos de medición para poder observar las interacciones entre las plumas cuando se cambia el ángulo entre los tapones, los cuales se muestran en la Figura N° 1. Al agua del modelo se le agregaron esferas de poliamida de $5\text{ }\mu\text{m}$ como partículas trazadoras. Se utilizó como fuente láser el sistema Litron® modelo LDY302. Este modelo produce un plano láser de color verde de 5 mm de espesor, con una longitud de onda de 532 nm , energía de pulso de 15 mJ y una frecuencia de 150 ns . El láser se operó al 45% de su poder total (1800 W). Para capturar el movimiento de las partículas trazadoras, se colocó a 90° del plano de medición una cámara de alta velocidad SpeedSense® M320. La cámara de alta velocidad y el control de la fuente láser se conectaron a un sincronizador a fin de que el pulso láser y la imagen capturada sean sincrónicas. Una computadora con el software DynamicStudio® 2015b se utilizó para realizar las mediciones. La computadora está conectada al sincronizador para capturar las imágenes con una frecuencia de 450 Hz . Para obtener mediciones precisas, se capturaron y procesaron 1351 imágenes en cada experimento.

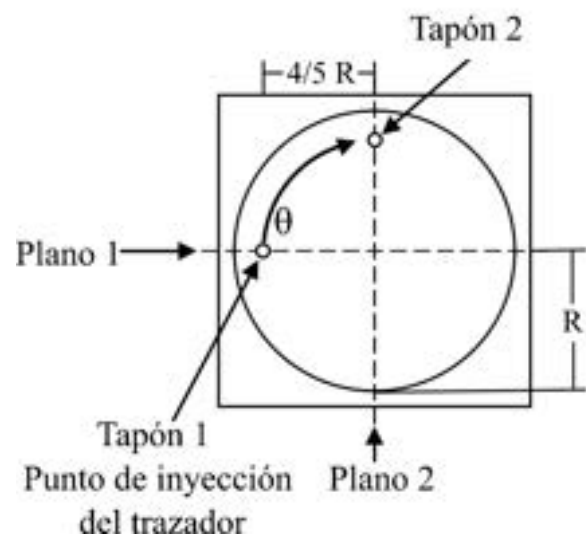


Figura N° 1. Vista superior de los planos de medición usados para obtener los vectores de velocidad con la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y los contornos de concentración con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF).

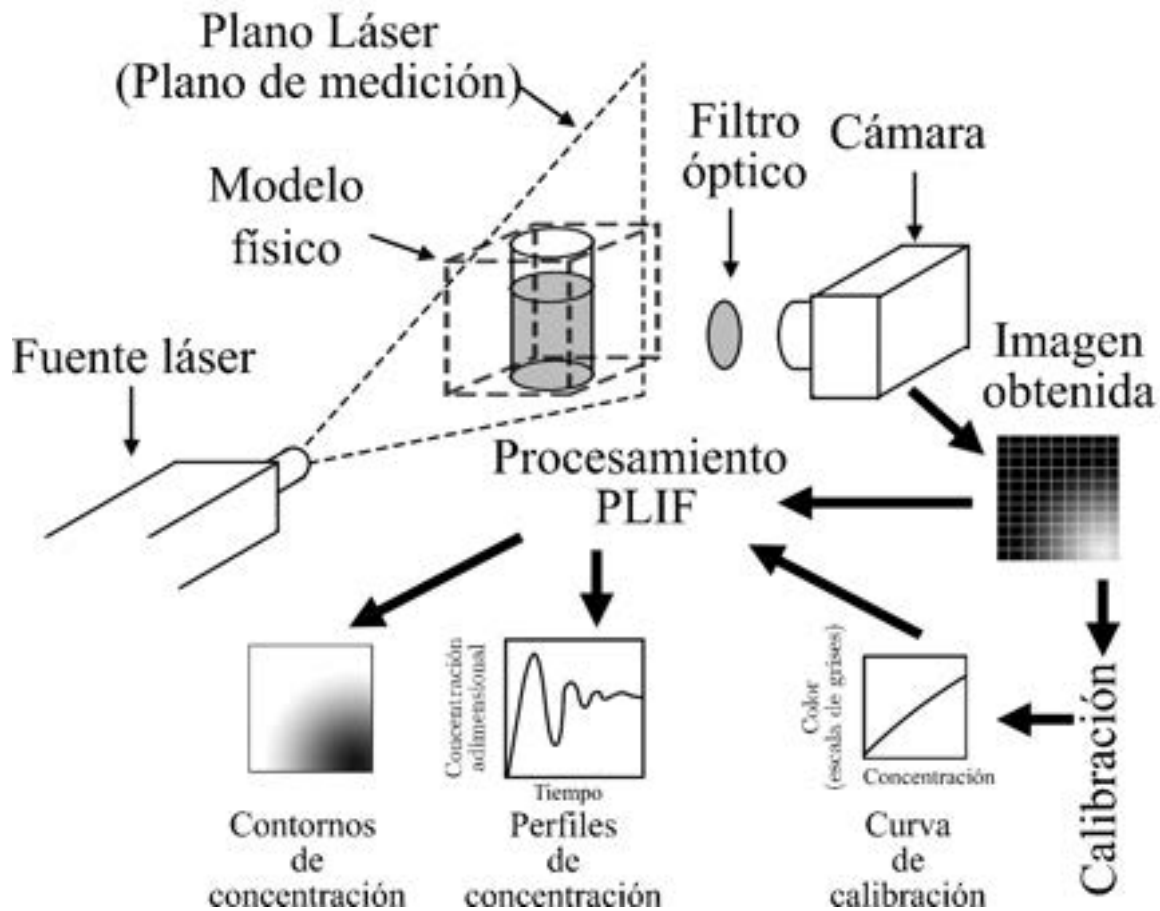


Figura N° 2. Esquema del procedimiento típico para obtener mediciones usando la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF).

La técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) no es tan conocida y aplicada como la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV), algunas publicaciones en donde se usa para medir tiempos de mezclado dentro de reactores metalúrgicos se pueden encontrar en Ascanio (2015) y Jardón-Pérez *et al.* (2019a). La Figura N° 2 muestra un esquema de cómo se realiza comúnmente una medición de tiempo de mezclado usando la técnica PLIF. Como trazador se emplean sustancias fluorescentes, aprovechando la emisión de luz de estas al ser iluminadas con una hoja de luz láser. La cámara para capturar la fluorescencia del trazador tiene un filtro de banda estrecha que permite que solo capture la longitud de onda emitida por el trazador. La luz total capturada por la cámara depende de muchos factores, pero en condiciones controladas se puede hacer que el cambio solo dependa de la concentra-

ción del trazador fluorescente, por lo cual se necesita hacer una calibración antes de realizar las mediciones. El objetivo de la calibración es conocer la relación entre la concentración del trazador y la señal (en escala de grises) capturada por la cámara. El procedimiento de calibración consiste en adquirir imágenes a una concentración conocida y homogénea dentro del sistema y medir el color capturado por la cámara a las diferentes concentraciones, obteniendo la curva de calibración en escala de grises contra concentración. Una vez calibrado el sistema para la medición, se puede realizar el experimento para obtener los tiempos de mezclado. Se inyecta el trazador dentro del modelo y los cambios en la concentración se miden hasta que se alcanza una concentración de equilibrio. Al contrario de utilizar técnicas como la conductimetría o pH-metría, la técnica PLIF permite medir la concentración instan-

tánea en todo el plano iluminado por el láser, obteniendo no solo el tiempo de mezclado sino como se mezcla el soluto dentro del modelo de la olla, permitiendo observar cómo se mueve el trazador durante la duración del experimento y con el beneficio adicional de no introducir instrumentos de medición que modifican sensiblemente el patrón de flujo. En este trabajo se sigue el procedimiento de Jardón-Pérez *et al.* (2019b), para medir el tiempo de mezclado. Las mediciones de tiempo de mezclado se realizaron en el plano 2 (ver Figura N° 1); debido a la naturaleza óptica de la técnica PLIF, la hoja láser que incide sobre las burbujas de la pluma crea sombras y reflejos que deben ser sustraídos en la medida de lo posible para lograr mediciones confiables (Jardón-Pérez *et al.*, 2019b). Cuando se usaron 90° como ángulo de separación, fue prácticamente imposible evitar los efectos ópticos de la pluma. Sin embargo, se lograron reducir los errores al máximo utilizando el flujo más bajo posible en el tapón 2 y enmascarando la región de la pluma en las imágenes capturadas antes de realizar las mediciones. El colorante fluorescente usado como trazador fue Rodamina 6G. Se realizó una calibración de 20 puntos antes de realizar las mediciones de los tiempos de mezclado. Los puntos de la calibración se realizaron con soluciones de Rodamina 6G con concentraciones que varían de 0 (blanco) hasta las 4.4 partes por mil millones (ppb). Los experimentos de tiempo de mezclado se realizaron añadiendo 3 mL de una solución con una concentración de 1 ppm de Rodamina 6G directamente sobre el tapón 1 y monitoreando los cambios en la concentración por 90 s con una cámara Canon® EOS Rebel T5 con un filtro óptico de 570 nm. Las imágenes de la calibración y los experimentos fueron preprocesadas con un software convertidor de video a imágenes por lote XnConvert y después procesados en MATLAB para obtener los tiempos de mezclado y los contornos de concentración instantánea. Cada experimento se realizó por triplicado.

Considerando los dos ángulos de separación y los dos modos de inyección, se propuso realizar un diseño de experimentos factorial completo de dos niveles con dos factores. Por lo tanto, se realizaron 22 experimentos. La Tabla N° 1 contiene el diseño de experimentos realizado con los valores bajos y altos de cada factor y la nomenclatura utilizada. En todos los casos se midió la fluidodinámica con la técnica PIV y se midió el tiempo de mezclado con la técnica PLIF para las condiciones de operación mostradas en la Tabla N° 1.

Resultados y Discusión de Resultados

Patrones de Flujo

La Figura N° 3 muestra los patrones de flujo obtenidos con la técnica PIV en el plano 1 para los cuatro experimentos realizados. El tapón 1, que es el que aporta la mayor cantidad de gas en el modo de inyección diferenciado esta siempre presente. La Figura N° 3a muestra una zona de alta velocidad del lado derecho, que comienza desde el mismo lugar que el punto de inyección de gas. Este movimiento es causado por la boyancia de las burbujas que cuando ascienden, arrastran el agua que entra en contacto con ellas. Esta región que tiene un flujo mezclado de aire (en forma de burbujas) y agua se le llama pluma. La velocidad de la pluma se incrementa conforme la burbuja acelera debido a la fuerza boyante. Cerca de la superficie superior del modelo, la velocidad disminuye debido a la disipación de energía causada por la presencia de la capa de aceite. La pluma tiene una forma cónica debido a la fuerza de dispersión turbulenta. Una vez que la pluma llega a la superficie superior del modelo, el agua no puede continuar su trayectoria y se desvía lateralmente hacia la superficie del modelo de acrílico formando diferentes estructuras de flujo. La estructura del flujo depende de las fuerzas que afectan su movimiento. En este caso, como el tapón está cerca de la pared, el movimiento de la pluma está restringido por la pared misma, haciendo que el flujo de agua se dirija hacia el centro del modelo. En esta misma Figura N° 3a se puede observar del lado izquierdo la presencia de una zona de recirculación. Esta zona de recirculación tiene forma de un toroide y cubre solo la parte superior izquierda del plano de medición, mientras que el resto del plano son zonas con baja velocidad.

La Figura N° 3b presenta los patrones de flujo para el experimento B en el plano 1. La diferencia entre el experimento A y el B es el modo de inyección. En el plano 1, el experimento B presenta una cantidad mayor de flujo que el experimento A. También se puede observar que el experimento A y B tienen un comportamiento similar en el plano de medición 1. Aun así, el experimento B tiene una mayor velocidad en la pluma y una zona de recirculación más extensa que el experimento A, debido a la mayor cantidad de gas inyectada en tapón 1 del experimento B.

El ángulo de separación es la variable que cambia entre el experimento A y C. Esto se observa en el número de plumas que muestran las mediciones de la técnica PIV en el plano 1. El experimento A solo muestra una pluma, mientras que el experimento C (Figura N° 3c) muestra dos plumas. En el experimento C, la presencia de las dos plumas genera zonas de velocidad alta, una en cada lado del plano 1 y cada pluma genera recirculaciones en lados opuestos de las paredes de acrílico. Dado que la cantidad de gas inyectado en cada tapón es igual en el experimento C, ambas plumas tienen una velocidad similar. Asimismo, las zonas de recirculación de ambas plumas tienen un tamaño y velocidad casi idénticas, creando un patrón de flujo casi-simétrico, con pequeñas y sutiles diferencias, explicadas por la naturaleza caótica de los flujos turbulentos. La única zona de baja velocidad en el experimento C se encuentra debajo de las zonas de recirculación; esta zona de baja velocidad es sensiblemente más pequeña que en el experimento A.

El experimento D (Figura N° 3d) muestra dos plumas en el plano 1, pero al contrario que el experimento C, las plumas no tienen naturaleza simétrica debido a que se usó flujo diferenciado. Para la inyección diferenciada la pluma derecha es la correspondiente al tapón 1 y la pluma izquierda corresponde al tapón 2. La pluma derecha es más grande ya que es en donde se está inyectando la mayor cantidad de gas. Al ser más grande esta pluma, arrastra un poco la porción superior de la pluma izquierda, separándola un poco de la pared de acrílico. Aunque los patrones de flujo del experimento D no son simétricos, las zonas de baja velocidad tienen una extensión similar a las que muestra en experimento C, pero con una distribución diferente, siendo desplazadas ligeramente al lado izquierdo del plano de medición.

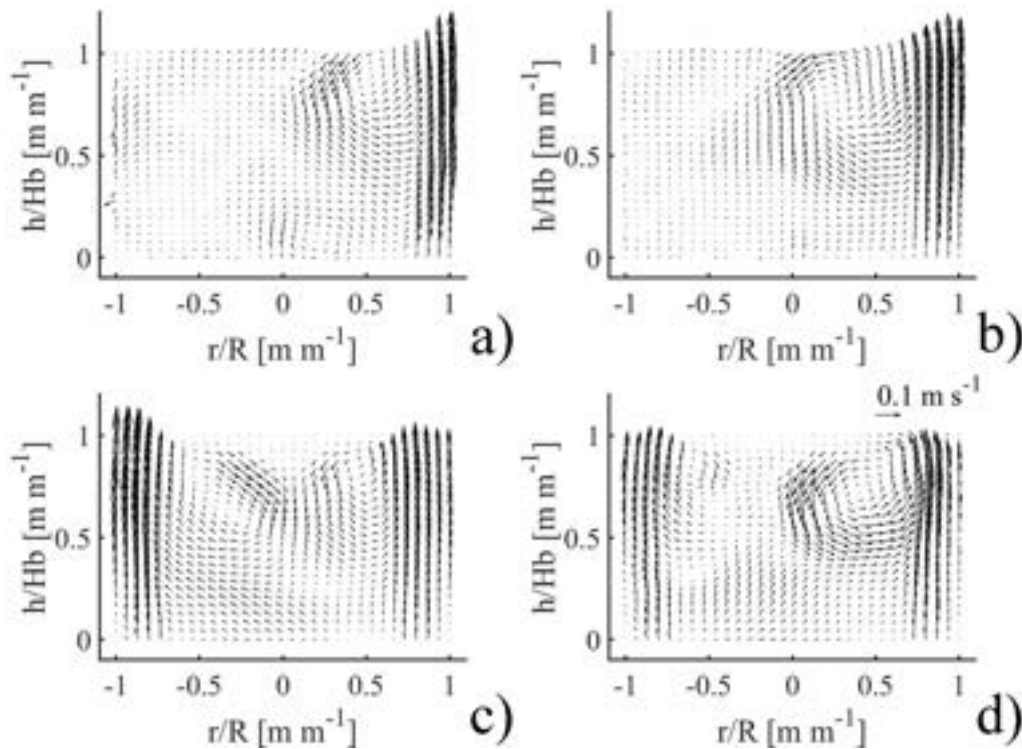


Figura N° 3. Patrones de flujo obtenidos con la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en el plano 1, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Para entender mejor la interacción entre ambas plumas en los diferentes experimentos, se obtuvieron patrones de flujo en un segundo plano de medición (plano 2 en la Figura N° 1). La Figura N° 4 muestra los patrones de flujo obtenidos para los cuatro experimentos de la Tabla N° 1.

El experimento A muestra el mismo comportamiento que en el plano de medición 1 (Figura N° 3a) en el plano de medición 2 (Figura N° 4a) ya que se usa el modo de inyección igualado. Ambas plumas ascienden y generan un flujo radial de agua en la superficie hasta que chocan entre ellas. Esta colisión genera un flujo que desciende y se reincorpora a la pluma original, generando toroides en ambas plumas. Esta interacción entre las plumas es la razón por la cual la zona de recirculación solo cubre la esquina superior izquierda en ambos planos de medición. Dado que ambos tapones tienen el mismo flujo de gas, ambas plumas chocan con la misma fuerza y se abaten mutuamente. Esta colisión disipa la energía de ambas plumas y por lo tanto hay un gran volumen de agua que tiene poco movimiento.

En el plano 2 no está presente ningún punto de inyección en el experimento C (Figura N° 4c), por lo cual los patrones de flujo obtenidos muestran velocidades más bajas que las mostradas en el plano 1 (Figura N° 3c) para el mismo experimento. La mitad superior del plano 2 muestra un movimiento descendente que corresponde al movimiento de las corrientes de recirculación reincorporándose a las plumas del plano 1. La región inferior del modelo muestra las dos regiones de recirculación en ambos lados del modelo, así como zonas de baja velocidad cerca de las esquinas del plano de medición.

Considerando los patrones de flujo para los experimentos A y C en ambos planos, el uso de un ángulo de separación de 180° entre los tapones muestra zonas muertas a una altura menor que para los experimentos con un ángulo de separación de 90° cuando se usa el modo de inyección igualado.

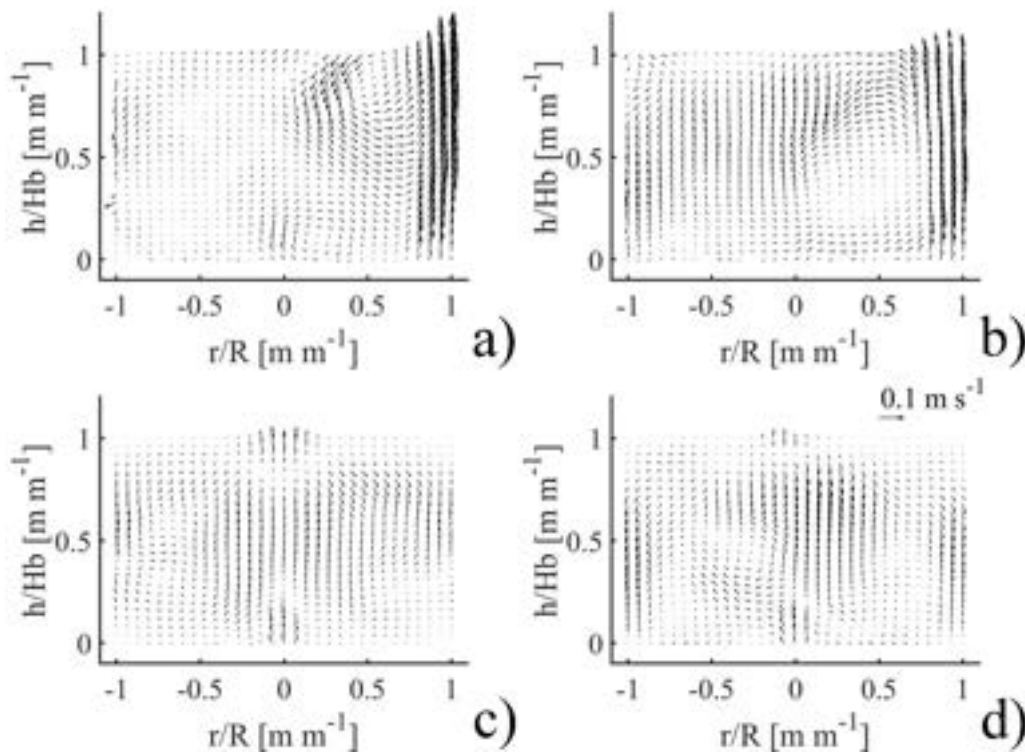


Figura N°4. Patrones de flujo obtenidos con la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) en el plano 2, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Cuando se usa el modo de inyección diferenciado, las mediciones en el plano 2 muestra un comportamiento radicalmente diferente comparado con el patrón obtenido a cuando se usa la inyección igualada. La magnitud de la velocidad en la región de la pluma disminuye cuando se usa inyección diferenciada y las recirculaciones tienen una distribución diferente sobre el plano. En el experimento B (Figura N° 4b) la recirculación cubre casi toda la extensión del plano 2. Solo hay zonas de baja velocidad cerca de la esquina superior y la esquina inferior izquierda. Considerando los patrones de flujo de ambos planos de medición, cuando se usa inyección diferenciada con tapones separados 90°, muy poco volumen de agua presenta poca velocidad cuando se comparan contra inyección igualada. Esto significa que cuando se usa flujo de gas diferente en cada tapón, la colisión entre las plumas no disipa tanta energía como en el caso donde sale la misma cantidad de gas de cada tapón, por lo que en lugar de abatirse mutuamente, se redireccionan ambas plumas.

El experimento D (Figura N° 4d) y el experimento C (Figura N° 4c) muestran patrones de flujo similares en el plano 2, sin embargo, el experimento D muestra velocidades mayores. Esto se debe a que en el modo de inyección diferenciado se modifica la posición y la magnitud de la recirculaciones de ambas plumas, por lo que el plano 2 presenta una mayor velocidad descendente dado que la recirculación más grande tiene mayor velocidad para reincorporarse a la pluma correspondiente.

Tiempo de mezclado

La Figura N° 5 muestra la evolución de la concentración adimensional del trazador en el tiempo para cada experimento. Todas las curvas fueron obtenidas usando la técnica PLIF en el plano 2. Las curvas de la Figura N° 5 presentan un comportamiento similar a las curvas obtenidas con las técnicas tradicionales de pH-metría y conductimetría en estudios similares (Amaro-Villeda *et al.*, 2012). Justo después de la inyección del trazador al tiempo cero, hay un súbito incremento de la concentración, seguido de oscilaciones alrededor de la la concentración de equilibrio hasta que los cambio en la concentración son mínimos y se alcanza la concentración de equilibrio $\pm 5\%$. Con las técnicas usuales para obtener los tiempos de mezclado la información del mezclado está limitado a solo un punto dentro del sistema, por el contrario, la técnica PLIF considera todo un plano dentro del sistema, por lo que la información obtenida es representativa de los fenómenos de mezclado dentro del modelo físico. Además, debido a que no es necesario un sensor dentro del sistema, no modifica la fluidodinámica y el comportamiento del trazador durante el mezclado. Estas características justifican el mayor costo, de tiempo y dinero, en comparación a técnicas tradicionales usando sensores para medir el tiempo de mezclado (Jardón-Pérez *et al.*, 2019b).

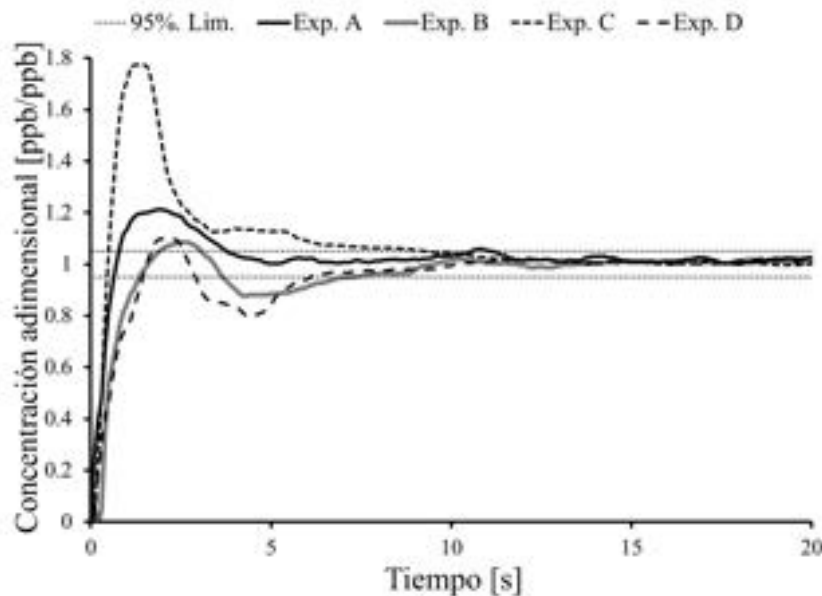


Figura N° 5. Curvas de evolución de la concentración (adimensional) obtenidas con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF). Los cambios en la concentración fueron medidos en el plano 2, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Además de las curvas de concentración contra el tiempo, la técnica PLIF permite obtener contornos de concentración instantánea. Una serie de estos contornos se presenta en la Figura N° 6, donde se presentan los mapas de concentración a tiempos seleccionados de una de las réplicas del experimento B. En dicho experimento se usa una separación de 90° entre los tapones y el modo de inyección diferenciada. Los contornos de concentración se midieron en el plano 2, mientras que la adición del trazador se realizó perpendicular al plano justo sobre el tapón 1, que se encuentra detrás del plano mencionado. Considerando la curva del experimento B en la Figura N° 5 y los contornos de la Figura N° 6, podemos relacionar las oscilaciones en la curva del tiempo de mezclado con la evolución de la concentración del trazador en los contornos observados, que aunado a los patrones de flujo medidos con PIV nos permite conocer la trayectoria y dispersión del trazador dentro del modelo físico.

La Figura N° 6a muestra una concentración homogénea en todo el plano, esta concentración es casi cero ppb. La Figura N° 6b tiene una zona con alta concentración cerca de la superficie del modelo, que

corresponde a la adición del trazador. Esta zona de alta concentración se dispersa a la izquierda del plano de medición, ya que el trazador sigue el patrón de flujo presentado en la Figura N° 3b; el trazador se inyecta cerca de la superficie justo sobre el tapón 1 y también es empujado hacia la izquierda por la inyección de gas visible en el plano 2, siguiendo ahora el patrón de flujo de la Figura N° 4b. La Figura N° 6c presenta un incremento del tamaño del área de alta concentración, cerca de la región superior derecha del plano. El trazador se comporta como una nube de alta concentración que sigue el patrón de flujo descrito previamente. Después de dos segundos a partir de la inyección, el trazador se sigue moviendo como una nube de alta concentración, pero comienza a dispersarse lateralmente debido a la turbulencia como se puede ver en la Figura N° 6d. Después de tres segundos, Figura N° 6e, la nube de alta concentración comienza a dispersarse conforme sigue el patrón de flujo de la Figura N° 4b, pero también se observa que la concentración promedio de la nube baja, ya que se va incorporando al flujo recirculatorio mostrado en la Figura N° 3b, que está detrás del plano de medición. La Figura N° 6f muestra una concentración más homogénea en todo el plano de

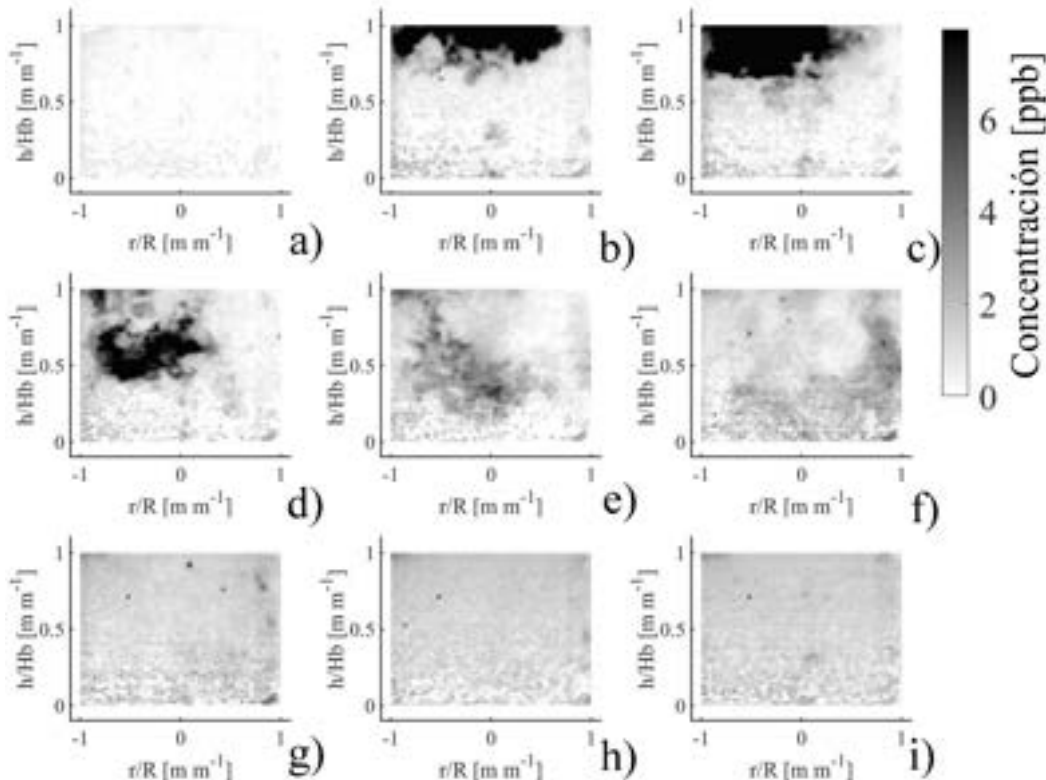


Figura N° 6. Contornos de concentración instantánea del experimento B, obtenidos con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) en el plano 2. Los contornos presentados fueron medidos a los tiempos: a) 0.0 s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 3.0s, f) 5.0 s, g) 7.0 s, h) 9.0 s, and i) 15.0 s.

medición. La esquina superior derecha del plano parece tener una concentración más alta ya que el trazador continua la trayectoria del patrón de flujo descrito anteriormente. Siete segundos después de la inyección del trazador, Figura N° 6g, el plano de medición parece tener una concentración homogénea casi completa. La Figura N° 6h muestra que la concentración es homogénea en todo el plano después de 9 segundos, esta concentración permanece prácticamente sin cambios seis segundos después, como se muestra en la Figura N° 6.

Comparando la Figura N° 6 con la evolución de la concentración adimensional del experimento B en la Figura N° 5, la concentración se incrementa súbitamente cuando se inyecta el trazador, disminuyendo poco después a causa del flujo de recirculante presente en el plano 1, y finalmente la concentración se incrementa hasta alcanzar la concentración de equilibrio en el plano 2.

Este mismo análisis puede realizarse a los demás experimentos que se muestran en la Tabla N° 1. Se puede estudiar a mayor profundidad el mezclado si se consideran los contornos de turbulencia medidos con la técnica PIV.

La Tabla N° 1 muestra los tiempos de mezclado obtenidos para los cuatro experimentos realizados. El tiempo de mezclado fue medido usando el criterio de 95% de la concentración de equilibrio, como se puede ver en la Figura N° 5. La desviación estándar fue de menos de 12% para todos los experimentos. Cuando se usa el modo de inyección igualada y un ángulo de separación de 180° se obtiene un tiempo de mezclado casi un segundo menor a cuando se usa una separación de 90°, lo cual es consistente con

trabajos previamente publicados (Amaro-Villeda *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019). Este pequeño decremento se puede explicar considerando que el experimento A tiene zonas de baja velocidad más extensas que el experimento C (Figura N° 3 y Figura N° 4, respectivamente). Por otra parte, cuando se usa inyección diferenciada el tiempo de mezclado para la separación entre tapones de 90° (Experimento B) es casi el mismo que cuando se usa una separación de 180° (Experimento D), mostrando en ambos casos que el tiempo de mezclado disminuye ya que las zonas de baja velocidad son reducidas. La poca extensión de las zonas de baja velocidad en los experimentos B y D son provocadas por las complejas interacciones entre las plumas de diferente flujo de gas. Usando el modo de inyección diferenciado, el tiempo de mezclado disminuye 3.8 s para una separación de 90°. En el mismo modo usando una separación de 180°, el tiempo de mezclado disminuye 2.9 s. El experimento B es que logra disminuir en mayor medida el tiempo de mezclado ya que es el caso con zonas de baja velocidad más reducidas.

Considerando la disminución de los tiempos de mezclado y los cambios en la fluidodinámica de cada sistema, el modo de inyección diferenciada es recomendado para las condiciones de operación revisadas en este trabajo. Se puede realizar un estudio más completo considerando las condiciones de operación ya estudiadas por otros autores (Chattopadhyay *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2011; Haiyan *et al.*, 2016; Conejo *et al.*, 2019). El uso combinado de las técnicas PIV y PLIF ayuda a explicar y aclarar el efecto de los diferentes diseños y variables de operación en ollas agitadas por gas ya que puede obtenerse el comportamiento del flujo y el mezclado al mismo tiempo.

		Experimento			
		A	B	C	D
Angulo de separación, θ (°)		90	90	180	180
Proporción de flujo, R_a (%/%)		50/50	75/25	50/50	75/25
Tiempo de mezclado, τ_{mix} (s)		0,54	0,0028	0,192	0,145
Desviación estándar	(s)	1.3	0.8	1.0	0.6
	(%)	11.8	11.0	10.3	8.7

Tabla N° 1. Matriz del diseño de experimentos y tiempos de mezclado medidos en el plano 2 (ver Figura N° 1) para cada experimento realizado.

Conclusiones

El uso de flujo diferenciado en modelos de horno olla con inyección dual representa una mejora en el desempeño del reactor, ya que cuando se colocan los tapones a 0.8R y 90° de separación, se reduce el tiempo de mezclado a un mínimo de 7.1 s (± 0.8 s). Esto se debe a que disminuye la extensión de las zonas de baja velocidad (zonas muertas) dentro del modelo. Cuando se comparan los modos de inyección igualado y diferenciado, los tiempos de mezclado con la posición de los tapones a 90° disminuyen 3.8 s.

El uso de la técnica PIV junto con la técnica PLIF es una herramienta útil para estudiar y analizar a profundidad el efecto del diseño y variables de operación en ollas agitadas por gas. La posibilidad de obtener los patrones de flujo, el tiempo de mezclado y los contornos de concentración instantánea permite comprender el comportamiento de los mecanismos de mezclado que gobiernan la olla. Estas técnicas tienen la ventaja de ser no intrusivas y pueden obtener todo un plano de medición, en vez de mediciones puntuales. Estas mejoras justifican su mayor costo en comparación con técnicas de visualización de flujos tradicionales.

Agradecimientos

R. Villarreal-Medina agradece a CONAHCYT por recibir una beca doctoral (Numero de CVU 1002868). L. E. Jardón-Pérez agradece a CONAHCYT por recibir una beca postdoctoral CVU (Numero de CVU 624968).

Referencias

Amaro-Villeda AM, Conejo A, Ramírez-Argáez MA. 2012. Effect of slag on mixing time in gas-stirred ladles assisted with a physical model. *MRS Proc* 1485: 101-106.

Ascanio G. 2015. Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques. *Chin J Chem Eng* 23: 1065-1076.

Chattopadhyay K, SenGupta A, Ajmani SK, Lenka SN, Singh V. 2009. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle: a water model study. *Ironmak Steelmak* 36: 537-542.

Conejo AN, Mishra R, Mazumdar D. 2019. Effects of nozzle radial position, separation angle, and gas flow partitioning on the mixing, eye area, and wall shear stress in ladles fitted with dual plugs. *Metall Mater Trans B* 50: 1490-1502.

Haiyan T, Xiaochen G, Guanghui W, Yong W. 2016. Effect of gas blown modes on mixing phenomena in a bottom stirring ladle with dual plugs. *ISIJ Int* 56: 2161-2170.

Jardón Pérez LE, Amaro-Villeda A, Conejo AN, González-Rivera C, Ramírez-Argáez MA. 2018. Optimizing gas stirred ladles by physical modeling and PIV measurements. *Mater Manuf Process* 33: 882-890.

Jardón-Pérez LE, González-Morales DR, Trápaga G, González-Rivera C, Ramírez-Argáez MA. 2019a. Effect of differentiated injection ratio, gas flow rate, and slag thickness on mixing time and open eye area in gas-stirred ladle assisted by physical modeling. *Metals* 9: 555.

Jardón-Pérez LE, Amaro-Villeda A, González-Rivera C, Trápaga G, Conejo AN, Ramírez-Argáez MA. 2019b. Introducing the planar laser-induced fluorescence technique (PLIF) to measure mixing time in gas-stirred ladles. *Metall Mater Trans B* 50: 2121-2133.

Liu H, Qi Z, Xu M. 2011. Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual plugs. *Steel Res Int* 82: 440-458.

Liu Z, Li L, Li B. 2017. Modeling of gas-steel-slag three-phase flow in ladle metallurgy: Part I. Physical Modeling. *ISIJ Int* 57: 1971-1979.

Liu Y, Ersson M, Liu H, Jönsson PG, Gan Y. 2019. A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy. *Metall Mater Trans B* 50: 555-577.

Thaker AH, Bhujbal SV, Buwa VV. 2020. Effects of sloshing gas-liquid interface on dynamics of meandering bubble plumes and mixing in a shallow vessel: PIV and PLIF measurements. *Chem Eng J* 386: 122036.