



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA

“Estudio Mediante Modelación Física de la Agitación del Acero en una Olla de Colada Continua Mediante la Inyección de Gas con Velocidad Tangencial”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA

PRESENTA:

M. en C. Gerardo Aguilar Ávila

ASESOR:

Dr. Gildardo Solorio Díaz

CO – ASESOR:

Dra. Alicia Aguilar Corona

Morelia Michoacán, Marzo del 2022



A mi familia y amigos...

ÍNDICE GENERAL

Contenido

Resumen.....	VIII
Abstract	IX
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del Problema.....	7
1.3 Justificación.....	8
1.4 Hipótesis.....	10
1.5 Objetivos	11
General:	11
Específicos:	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1 La Olla Metalúrgica	12
2.2 Operaciones Metalúrgicas en la Olla	14
2.2.1 Desoxidación.....	14
2.2.2 Desgasificación	14
2.2.3 Desulfuración	15
2.2.4 Desfosforación	15
2.2.5 Descarburación.....	16
2.3 Inyección de las Burbujas de Argón y Agitación.....	16
2.4 Medios de Agitación	18
2.5 Tiempos de Mezclado	21
2.6 Remoción de Inclusiones	22
2.7 Apertura de la Capa de Escoria	24
2.8 Conductividad Eléctrica	26
2.9 Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV).....	26
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	29
3.1 Introducción a la Simulación Física.....	29

3.1.1 Criterios de Similitud en la Simulación Física	29
3.1.2 Análisis Adimensional	30
3.2 Construcción del Modelo Físico	34
3.3 Inyección del Aire con Modificadores de Flujo.....	36
3.4 Obtención de los Tiempos de Mezclado Mediante la Técnica de Conductividad Eléctrica ...	38
3.4.1 Detección de las Zonas de Baja Velocidad en la Olla.....	38
3.4.2 Medición de los Tiempos de Mezclado.....	42
3.5 Obtención de los Campos de Velocidad Mediante la Técnica de PIV	44
3.6 Arreglos Estudiados	46
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	48
4.1 Experimentación de los Arreglos con Toberas.....	48
4.1.1 Tiempos de Mezclado de los arreglos con toberas.....	48
4.1.2 Resultados de la Experimentación con la Técnica de PIV: Análisis de la Fluido Dinámica de la Olla de los Arreglos con Toberas	52
4.2 Experimentación de los Arreglos con Modificadores de Flujo	59
4.2.1 Tiempos de Mezclado de los Arreglos con Modificadores de Flujo.....	64
4.2.2 Resultados de la Experimentación con la Técnica de PIV: Análisis de la Fluido Dinámica de la Olla de los Arreglos con Modificadores de Flujo.....	65
Conclusiones	73
Trabajo Futuro: Generación de un Flujo Rotacional Mediante una Inyección de Aire por el Costado de la Tobera.....	75
Referencias	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido

Figura 1. La Olla Metalúrgica en el Proceso Real	12
Figura 2. Jet de burbujas	17
Figura 3. Regímenes de la Dispersión del Gas en el Líquido 1) Régimen Primario, 2) Régimen Libre, 3) Jet y 4) Tapón.....	18
Figura 4. Medio de Agitación Direccional Usado en el Proceso Real	19
Figura 5. Diferentes Arreglos de los Medios de Agitación Usados en la Industria y en la Investigación	19
Figura 6. Medios para Agitación: a) Poroso y b) Direccional.....	20
Figura 7. Medios para Agitación: a) y b) Medio Poroso y c) Medio Poroso con Canales Direccionales.....	21
Figura 8. Apertura de la Capa de Escoria Debido a la Inyección de Gas de Dos Medios Porosos en el Proceso Real.....	25
Figura 9. Esquema Típico del PIV	27
Figura 10. Geometría del Prototipo a) Olla y b) Medio de Agitación.....	35
Figura 11. Arreglos de las Toberas en el Modelo Físico: a) Modelo Visto en Isométrico y b) Vista Superior.....	36
Figura 12. Vista Superior de los Canales del Modificador de Flujo	37
Figura 13. Modificadores de Flujo de Diferentes Ángulos Propuestos por Urbina y Colaboradores	37
Figura 14. Vista Lateral de la Inyección del Trazador para el Caso de 1 Tobera Colocada a 0.75R y un Flujo de 4.9 l/min. a) 2 Segundos, b) 6 Segundos, c) 9 Segundos y d) 11 Segundos	39
Figura 15. Vista Frontal de la Inyección del Trazador para el Caso de 1 Tobera Colocada a 0.75R y un Flujo de 4.9 l/min. a) 2 Segundos, b) 6 Segundos, c) 9 Segundos y d) 11 Segundos	40
Figura 16. Posición de los Sensores	42
Figura 17. Arreglo Experimental Usado en los Experimentos de los Tiempos de Mezclado.....	44
Figura 18. Sistema de Instrumentación del PIV.....	46
Figura 19. Curva Tiempo – Concentración para el Caso con 1 Tobera Colocada a 0.75R y un Flujo de 4 l/min.....	48
Figura 20. Tendencia del Tiempo de Mezclado para los 3 Arreglos de las Toberas.....	50

Figura 21. Campos de Velocidad en el Plano Central, Perpendicular al Fondo de la Olla, Obtenidos Mediante la Técnica de PIV para el Caso con: 1 Tobera Colocada a 0.75R (a, b, c, d, e), 1 Tobera Colocada a 0.66R (f, g, h, i, j) y 2 Toberas Colocadas a 0.66R (k, l, m, n, o)	53
Figura 22. Líneas de Corriente en el Plano Central, Perpendicular al Fondo de la Olla, Obtenidas Mediante la Técnica de PIV para el Caso con: 1 Tobera Colocada a 0.75R (a, b, c, d, e), 1 Tobera Colocada a 0.66R (f, g, h, i, j) y 2 Toberas Colocadas a 0.66R (k, l, m, n, o)	54
Figura 23. Contornos de Velocidad Obtenidos Usando la Técnica de PIV en un Plano Transversal a la Mitad de la Altura de la Olla para Todos los Casos: a) Tobera, b) Modificador a 30°, c) Modificador a 60°, d) Modificador a 90°, e) Modificador a 120° y f) Modificador a 180°.....	59
Figura 24. Vectores de Velocidad Obtenidos Usando la Técnica de PIV en un Plano Transversal a la Mitad de la Altura de la Olla para Todos los Casos: a) Tobera, b) Modificador a 30°, c) Modificador a 60°, d) Modificador a 90°, e) Modificador a 120° y f) Modificador a 180°.....	60
Figura 25. Valores de V_x , V_y , y V_R para el Caso con Tobera a lo Largo del Diámetro de la Olla...	62
Figura 26. Relación de las Velocidades de los Casos con Modificadores de Flujo con Respecto al Caso con Tobera (T).....	63
Figura 27. Graficas Tiempo – Concentración Obtenidas para Todos los Casos Estudiados: a) Sensor Inferior y b) Sensor Superior.....	64
Figura 28. Jet de burbujas en la Experimentación para el Caso con 1 Inyección: a) Tobera, b) Modificador de Flujo a 60° y c) Modificador de Flujo a 120°.....	66
Figura 29. Campos de Velocidad, Líneas de Corriente y Contornos de Vorticidad en el Plano Central, Perpendicular al Fondo de la Olla, Obtenidos Mediante la Técnica de PIV para el Caso con 1 Inyección Usando: la Tobera (a, d y g), el Modificador de Flujo a 60° (b, e y h) y el Modificador de Flujo a 120° (c, f y i)	67
Figura 30. Jet de Burbujas en la Experimentación para el Caso con 2 Inyecciones: a) Tobera, b) Modificador de Flujo a 60° y c) Modificador de Flujo a 120°.....	69
Figura 31. Campos de Velocidad, Líneas de Corriente y Contornos de Vorticidad en el Plano Central, Perpendicular al Fondo de la Olla, Obtenidos Mediante la Técnica de PIV para el Caso con 2 Inyecciones Usando: la Tobera (a, d y g), el Modificador de Flujo a 60° (b, e y h) y el Modificador de Flujo a 120° (c, f y i)	70
Figura 32. Tubo Ranque – Hilsch	75

Simbología

D, d	Diámetro
F_r	Número de Froude
g	Gravedad
H	Altura
L	Longitud
Q, Q'	Caudal
R	Radio
R_e	Número de Reynolds
v	Velocidad
\overline{V}_R , \overline{V}_x y \overline{V}_y	Media de la velocidad resultante, componente x y componente y

Símbolos griegos:

η	Relación de las velocidades resultantes del modificador y la tobera
μ	Viscosidad dinámica
π	Número pi
ρ	Densidad
ν	Viscosidad cinemática

Unidades y dimensiones:

°	Grado
°C	Grado Celsius
g	Gramo
Hz	Hertz
kg	Kilogramo
l	Litro

μm	Micras
m	Metro
m^3	Metro Cubico
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
ms	Micro Siemens
Pa	Pascal
s	Segundo

Resumen

El uso de medios porosos para inyectar gas a través del fondo de una olla forma jets verticales de una manera muy similar a un cono truncado. El jet de gas al salir del medio poroso tiene un menor diámetro respecto al formado en la zona superior de la olla porque predominan las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de flotabilidad en esta zona. Además, la magnitud de la velocidad del jet se concentra en dirección ascendente, lo que aumenta la probabilidad de que se formen zonas de baja velocidad cerca del fondo de la olla, especialmente en las esquinas inferiores.

En esta investigación se usó un medio para agitar con canales en forma de espiral a diferentes ángulos de torsión, con el objetivo de que el gas al pasar por ellos, tenga una ganancia de velocidad tangencial o que la magnitud de la velocidad se distribuya en los tres ejes y no solo se enfoque en la dirección ascendente. Este medio de agitación ayudó a disminuir las zonas de baja velocidad cerca de la parte inferior de la olla y mejoró los tiempos de mezclado.

Para la experimentación se trabajó en un modelo escalado a 1:7 de una olla de colada continua con dos configuraciones de los medios de agitación: la primera alejada del centro 0.66 veces el radio (0.66R) y la segunda 0.75 veces el radio (0.75R), las cuales en trabajos anteriores se reportaron como las más eficaces para mezclar el líquido en este modelo. El tiempo de mezclado fue caracterizado mediante medidas experimentales usando la técnica de conductividad eléctrica, mientras que la dinámica del fluido en el interior de la olla fue caracterizada usando la técnica de PIV.

Los resultados obtenidos indican que los medios para agitación con canales de torsión con ángulos de 60° y 120° mejoran los tiempos de mezclado para las dos configuraciones de inyección.

Modificador de Flujo, Tiempo de Mezclado, PIV, Metalurgia, Refinación.

Abstract

Using porous plugs to inject gas through the bottom of a ladle forms vertical plumes in the same way as a truncated cone. The gas plume when it comes out of the plug has a smaller diameter with respect to that formed in the upper area of the ladle because the inertial forces prevail over the buoyancy forces in this area. In addition, the magnitude of the plume's velocity is concentrated in an upward direction, which increases the likelihood that low-velocity zones will form near the bottom of the ladle, especially in the lower corners.

In this research, a plug with spiral-shaped channels at different torsion angles was used, with the aim that the gas passing through them has a gain in tangential velocity or that the magnitude of the velocity is distributed in the three axes, and not just focus on the upstream direction. This plug helped decrease low speed zones near the bottom of the pot and improved mixing times.

For the experimentation, a 1:7 scaled model of a continuous casting ladle was worked on with two configurations of the plugs: the first one is 0.66 times the radius away ($0.66R$) and the second one is 0.75 times the radius away ($0.75R$), which in previous works were reported as the most efficient to mix the liquid in this model. The mixing time was characterized by experimental measurements using the electrical conductivity technique, while the fluid dynamics inside the ladle was characterized using the PIV technique.

The results obtained indicate that the plugs with torsion channels with angles of 60° and 120° improve the mixing times for the two injection configurations.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El acero es actualmente uno de los materiales más usados en diversos campos de la ingeniería en todo el mundo, por lo que muchas industrias como la automotriz, la de construcción, la militar e incluso la alimentaria dependen de los productos de este material. Y es debido a las exigencias del mercado actual y a la competitividad, que la calidad de los productos de acero ha ido en aumento con el pasar del tiempo, llegando a desarrollarse métodos más eficaces para su fabricación, ya que la reducción en el peso de los materiales de alto rendimiento aunado a la mejora de sus propiedades mecánicas y el incremento del reciclaje de los metales usados son nuevos retos que ponen énfasis en la importancia de la limpieza del acero.

De acuerdo a datos estadísticos, la producción de acero mundial en 2018 aumento 1,808.6 millones de toneladas respecto al 2017, lo que representa un aumento del 4.6%. De acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (Canacero), México aportó 20.2 millones de toneladas, aumentando su crecimiento anual en un 1.4% respecto al año anterior. Esto hizo que el país se situara como el productor de acero número 14 a nivel mundial, generando 672 mil empleos directos e indirectos, por lo que esta industria es de suma importancia ya que es vital en la fuente de ingresos de nuestro país.

Existen dos caminos a seguir para la fabricación de acero: mediante el horno básico al oxígeno y el horno de arco eléctrico y en ambos caminos la olla metalúrgica juega un papel muy importante ya que esta se encarga de dar el último ajuste a la composición química del producto final. En este reactor se presentan fenómenos turbulentos y térmicos que repercuten en la calidad del producto, tales como la inyección de argón por el fondo de la olla o la homogenización química y térmica del acero dentro de esta.

El proceso de agitación dentro de la olla es esencial para determinar la calidad del producto, por lo que un proceso de agitación ineficaz puede conducir a defectos como un alto número de inclusiones o la infiltración de escoria dentro del baño metálico, los cuales son responsables del mal desempeño del material.

Debido a la alta producción y las altas turbulencias se debe tener un mejor control del proceso dentro de la olla, razón por la cual cada vez es más común encontrar estudios más completos en donde se acoplan varios de estos fenómenos con el fin de obtener resultados más confiables. Y es debido a esto que la modelación física ha sido una herramienta muy útil en la ingeniería ya que permite reproducir y entender los fenómenos que se llevan a cabo en los procesos de manera eficaz, realista y sobre todo a un bajo costo. Debido a los avances tecnológicos en los campos de la modelación, los estudios de los procesos en ingeniería alrededor del mundo se han incrementado en los últimos años, en un afán de obtener productos de mejor calidad.

1.1 Antecedentes

La modelación de los procesos metalúrgicos de la olla ha ayudado a la comprensión del comportamiento dinámico del acero en las operaciones de refinación, por lo que múltiples estudios han adoptado esta metodología de trabajo usando ollas escaladas desde 1:3 hasta 1:18 [1 – 26].

La mayoría de estos modelos escalados se han utilizado en estudios donde se ha tratado de mejorar los procesos de refinación enfocándose en encontrar un arreglo ideal de los medios porosos que proporcione los mejores resultados sobre la variable de estudio en cuestión, tanto en modelación física [1 – 3, 5 – 6, 10, 16, 18 – 19, 23] como en simulación matemática [27 – 31], siendo de todas las variables existentes el tiempo de mezclado la más importante, debido a que es la que representa la eficacia de la producción en la planta.

El estudio de los diferentes arreglos existentes sobre los tiempos de mezclado es importante debido a que el número y la posición de los medios para la agitación va a cambiar la forma en cómo se distribuye la energía de agitación, reportando en ese sentido Calderón y colaboradores [24] que el mezclado depende de la energía de agitación en la olla, por lo que varios estudios pertinentes a este tema han concluido que los arreglos con un solo medio de agitación excéntrico lo más cercano a la pared ofrece los mejores resultados [1, 5 – 6, 10, 18, 21, 27]. Esto podría deberse a una menor pérdida de energía debido a la poca resistencia que presenta el volumen de fluido al momento del ascenso del jet de gas y a que el recorrido del gas se da a través de toda la olla. En contraste, algunos estudios han reportado que los arreglos con 2 medios de agitación presentan mejores resultados [21, 23, 29 – 30], mientras que otras sostienen que usar 3 medios de agitación va a proporcionar los mejores resultados [19, 31]. También, en el caso de medios duales, Villela y colaboradores [22] reportaron que el ángulo de separación entre estos es la variable más relevante para reducir el tiempo de mezclado, mientras que Gómez y colaboradores [23] reportaron que un incremento en el ángulo de separación incrementa el tiempo de mezclado. Con esto se podría afirmar que un determinado arreglo de los medios de agitación va a definir la forma en la cual la energía de agitación se distribuye dentro de la olla, por lo que detectar un

arreglo adecuado que minimice el tiempo de mezclado es de suma importancia para aumentar la eficacia del proceso. Por esta razón, y debido a la importancia de los medios de agitación, se han hecho estudios para probar cuales de los que se encuentran disponibles en el mercado es el más eficaz [32 – 33].

Por otro lado, la otra variable que es de suma importancia para el proceso y que tiene un gran efecto sobre el mezclado en la olla es el flujo de gas argón. En la industria, esta variable es seleccionada en base al tipo de operación que se desea realizar, por ejemplo, para la agitación y procesos como la desulfuración se agita intensamente, mientras que para la homogenización térmica o la flotación de inclusiones se usan flujos de argón más bajos. Esta variable no solo representa variaciones en la dinámica del proceso sino también costos económicos considerables, por lo que un gran número de investigadores ha estudiado esta variable en varios trabajos relacionados al tiempo de mezclado de la olla, y aunque, la gran mayoría de estos estudios han concluido que para disminuir el tiempo de mezclado se tiene que aumentar el flujo de argón [3 – 4, 6 – 7, 15 – 16, 21, 23, 27, 29, 34 – 36], otros han reportado que el tiempo de mezclado no disminuye después de cierto valor, manteniéndose este constante [18 – 19, 29, 31, 37], mientras que otros han expuesto que al aumentar el flujo de gas se incrementa el tiempo de mezclado bajo ciertas condiciones específicas [1, 5, 23, 38].

Conejo y colaboradores [5] y Gómez y colaboradores [23] reportaron que al aumentar el flujo de gas, el tiempo de mezclado en la olla disminuye; sin embargo, detectaron que en algunos casos, con flujos de gas bajos, la capa de escoria promovió una disminución en los tiempos de mezclado debido a que esta genera variaciones en el patrón de flujo, aunque sin presentar evidencia de este patrón. Esta investigación demuestra él porque es importante tomar en cuenta la estructura del fluido al interior de la olla, ya que de conocerse, sería posible dar una explicación más detallada de este resultado, ya que como reportó Calderón y colaboradores [24], las escorias más delgadas disminuyen el tiempo de mezclado al mejorar el patrón de flujo en la olla. Por otro lado, Nunes y colaboradores [2] quienes evaluaron el tiempo de mezclado relacionándolo con el comportamiento dinámico del flujo dentro de la olla mediante experimentación con la técnica de PIV, reportaron que los

mejores resultados se presentan con un flujo que presente una gran cantidad de zonas de recirculación distribuidas en toda la olla y con altas velocidades. Contrario a esto, González y colaboradores [1] estudiaron los tiempos de mezclado de la olla en función de la estructura de la fluido dinámica, reportando que el tiempo de mezclado depende del número, tamaño y localización de las recirculaciones que se forman dentro de la olla, por lo que en algunos casos no es necesario incrementar la tasa de flujo de gas para reducir el tiempo de mezclado. Algo muy similar fue reportado por Villela y colaboradores [22] quienes concluyeron que las diferencias en la estructura fluido dinámica son la causa principal de la variación del tiempo de mezclado, ya que una estructura que tiene recirculaciones grandes inhibe la distribución homogénea del trazador e incrementa el tiempo de mezclado, por lo que recomiendan que se genere una sola recirculación grande. Otros trabajos han concluido que la fluido dinámica del sistema es de suma importancia y que repercute en los tiempos de mezclado y otros fenómenos que se dan al interior de la olla. Tal es el caso del trabajo realizado por Geng y colaboradores [28] y Lin y colaboradores [39] quienes han hecho mención acerca de la importancia de la dinámica de fluidos sobre la distribución y el movimiento de las inclusiones, reportando que los movimientos de las partículas son determinados principalmente por el flujo del fluido, mientras que Kuo y Kuo [13] y Aoki y colaboradores [35] determinaron que el tiempo de mezclado depende principalmente del flujo del fluido. Además de los ya mencionados, Ramírez Argáez y colaboradores [21] y Turkoglu y Farouk [37] reportaron que lo que dicta el mezclado es la forma del líquido recirculatorio. Estos trabajos podrían sugerir que es más importante conseguir un patrón de flujo adecuado que simplemente inyectar grandes cantidades de aire. Zambrano y colaboradores [9] reportaron que, el hecho de aumentar el flujo de gas provoca un aumento en el nivel de turbulencia dentro de la olla, mientras que Li y colaboradores [10 – 12], Mazumdar y colaboradores [15] y Turkoglu y Farouk [37] reportaron que la capa de escoria presenta una apertura mayor cuando se aumenta el flujo de gas, lo cual podría tener repercusiones sobre la calidad del acero.

Shen y colaboradores [40] modificaron la dinámica de fluidos de la columna de gas mediante simulación numérica, colocando un cilindro por encima de la salida del gas de la

tobera con el fin de romper la pluma desde el fondo. Xiao y colaboradores [7] probaron 3 tipos de medios de agitación con diferentes formas en la geometría de salida: una con forma circular, una con forma de trébol de 3 hojas y la última con forma de trébol de 4 hojas. Esto con el objetivo de reducir la altura que alcanza la pluma una vez que esta rompe la capa de escoria, reportando que la geometría de salida del medio tiene un impacto importante en la altura que alcanza la pluma. También, Fangguan y colaboradores [41] utilizaron tres tipos de medios de agitación con diferentes geometrías y diámetros de hendidura en un modelo de agua, con el fin de investigar el efecto del diámetro de la hendidura en la agitación del acero, encontrando que a medida que aumentaba el diámetro de la hendidura, el tiempo de mezclado y la tasa de eliminación de inclusiones disminuyen cuando el caudal de gas es inferior a $5,26 \text{ NL} \cdot \text{min}^{-1}$. Siendo entonces el medio de agitación un medio importante para mejorar la eficiencia de la agitación del acero.

En este trabajo se diseña, se manufactura y se instala un medio de agitación con canales en forma de espiral con diferentes ángulos de torsión en una olla metalúrgica. Esta olla esta escalada a 1:7 con respecto a la usada en una empresa siderúrgica. El objetivo del tapón es el de aumentar la velocidad del gas al pasar por sus canales. Se usaron las técnicas de PIV (velocimetría de imágenes de partículas), inyección de trazador y dispersión de colorante, y se cuantificó su efecto sobre los tiempos de mezclado. Para la experimentación se trabajó con dos configuraciones de inyección de gas, los cuales se han reportado como los arreglos más eficaces para mezclar el acero en esta olla [1].

1.2 Planteamiento del Problema

Es conocido que dentro de la olla existen factores que están muy relacionados con la calidad del acero, como son: la técnica de agitación, la geometría de la olla, las características del flujo, la temperatura del acero líquido o el tipo de escoria.

En la actualidad los estándares de calidad en la limpieza del acero son muy exigentes, mientras que los equipos con los que se trabaja siguen siendo los mismos, por lo que, para mejorar la calidad del acero se tiene que mejorar la eficacia de los procesos actuales. Tal es el caso de los fabricantes en México, lugar en donde no se cuentan con equipos modernos que sean capaces de obtener aceros de alta calidad para obtener aceros de un alto grado de limpieza, por lo que se tiene que trabajar con la olla de refinación.

En la actualidad la agitación mediante argón ha sido el medio principal para lograr los beneficios sobre el producto final en la olla, por lo que para realizar esta operación se usan medios de agitación, los cuales tienen una gran influencia sobre los fenómenos dinámicos y térmicos que ocurren dentro de la olla. Aunque esta es una tecnología bastante eficaz, hay muchos aspectos del proceso que requieren de una mayor eficacia para poder obtener un producto de mayor calidad, tal es el caso de los jets de gas que forman recirculaciones que atrapan en su interior inclusiones pequeñas (de 1 a 40 micras) y evitan que estas lleguen a la superficie y sean atrapadas por la escoria, además de que dejan amplias zonas muertas en las partes bajas de la olla.

El uso de medios de agitación para inyectar el gas a través del fondo de la olla forma jets verticales que tienen una forma muy similar a un cono truncado. El jet de gas al salir del medio tiene un diámetro menor en comparación con la formada en la zona superior de la olla porque las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas de flotación en esta zona. Además, la magnitud de la velocidad del jet se concentra en una dirección ascendente, lo que aumenta la probabilidad de que se formen zonas de baja velocidad cerca del fondo de la olla, especialmente en las esquinas inferiores; sin embargo, estas también en ocasiones se forman en las esquinas superiores.

1.3 Justificación

Las operaciones de refinación dentro de la olla son de suma importancia para el acero debido a que es la etapa principal en la que se le da su composición química y térmica, así como el grado de limpieza que este pueda alcanzar.

La agitación con argón ha sido el medio principal para lograr los beneficios sobre el acero, beneficios que están en función del medio de agitación, el número de medios y su ubicación. Por ello, se han hecho múltiples estudios acerca del número y la posición radial de los medios de agitación, de tal modo que el flujo que se desarrolla dentro de la olla se modifique para aumentar la eficacia del proceso; sin embargo, los medios de agitación para agitación forman jets verticales, que dejan zonas muertas en el fondo del reactor. Esto dificulta la remoción de las inclusiones más pequeñas, afectando al tiempo de mezclado y a la homogenización química y térmica, lo que ocasiona que se obtengan productos que no cumplen con las especificaciones de los clientes que cada vez son más rigurosas.

En este trabajo, se propone un medio de agitación con canales en forma de espiral con diferentes ángulos de torsión, con el objetivo de que el gas, al pasar por ellos, tenga una ganancia de velocidad ya que se sabe que este tipo de flujo favorece la mezcla en reactores de otros procesos químicos [38, 42 – 43].

Al modificar el patrón de flujo en la olla mediante este medio, se espera que se reduzcan las velocidades verticales con las que asciende el gas. Al reducir las velocidades verticales se espera que disminuya la cantidad de las inclusiones más pequeñas que quedan atrapadas en el flujo, generar un menor desgaste en las paredes del refractario aumentando así la vida útil de las paredes, disminuir el impacto del flujo ascendente sobre la capa de escoria teniendo una apertura menor y disminuir las zonas muertas en el fondo de la olla. Con esto se alcanzaría una mejor homogenización química y térmica en menos tiempo y con menores cargas de gas, disminuyendo así el tiempo de mezclado de la olla. Esto produciría un mejor aprovechamiento de la energía de agitación, mayor durabilidad del refractario, menos costos en el mantenimiento de la olla y una mejora en la limpieza y la calidad del acero.

Este cambio en el diseño del tapón está orientado a la mejora del proceso de refinación secundaria en las plantas siderúrgicas del país.

1.4 Hipótesis

Una práctica común de agitación del acero en la olla de colada continua es inyectar un gas por el fondo de esta a través de uno o varios medios de agitación que se ubican en posiciones específicas, de tal manera que puedan cumplir con el propósito de alcanzar la homogenización adecuada del acero dentro de la olla. Esta práctica puede traer problemas de zonas muertas, baja eliminación de inclusiones y daño a las paredes del refractario debido a las trayectorias de los flujos ascendentes y descendentes desiguales que se desarrollan dentro de la olla. El problema se origina debido a que la pluma de gas comienza a salir del medio a un diámetro menor en comparación con el que se forma en la zona superior de la olla, lo que puede generar zonas muertas en la zona inferior y mantener ahí un gran número de inclusiones.

Generar un flujo que propicie una trayectoria angular desde que este entre a la olla podría alcanzar un mezclado más uniforme y a un tiempo menor, además de abarcar secciones más amplias a fin de eliminar zonas muertas. Este flujo, además podría generar menor desgaste en las paredes.

Finalmente, se espera que este flujo pierda intensidad conforme ascienda y tenga un menor impacto en la apertura de la capa de escoria, lo que se traduciría en un mejor control de las inclusiones exógenas de escoria que quedan atrapadas en el metal líquido, mejorando así la limpieza del producto.

1.5 Objetivos

General:

Evaluar mediante simulación física, la eficiencia en la agitación del acero en una olla de colada continua a través de la inyección por el fondo de la olla de gas con velocidad tangencial, utilizando un medio de agitación con canales a diferente ángulo de torsión.

Específicos:

1. Construir un modelo a una escala de 1/7 de la olla de colada continua con 2 configuraciones de inyección de gas eficientes, a través de medios de agitación.
2. Medir los tiempos de mezclado en el modelo a escala para las 2 configuraciones de inyección del gas a diferentes flujos (2, 3, 4, 4.9, 6 y 7 l/min) mediante la técnica de conductimetría.
3. Medir los campos de velocidad del fluido en el modelo a escala durante la agitación del líquido a través de la inyección de gas por las toberas para las 2 configuraciones de inyección utilizadas y a los diferentes flujos usados.
4. Diseñar y construir un modificador de flujo que localizado en la posición de un medio de agitación favorezca el incremento de la velocidad tangencial del gas.
5. Medir los tiempos de mezclado mediante la técnica de conductimetría durante la agitación del líquido en el modelo a escala a través de la inyección de gas por los modificadores de flujo para las 2 configuraciones de inyección utilizadas con las toberas para el flujo escalado.
6. Medir los campos de velocidad del fluido en el modelo a escala durante la agitación del líquido a través de la inyección de gas por los modificadores de flujo para el flujo escalado.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 La Olla Metalúrgica

El proceso de la olla (o metalurgia secundaria) es un paso entre el proceso del BOF (horno básico al oxígeno) y la colada continua y juega un papel muy importante en la fabricación de acero de alta calidad, ya que de ella depende el control de muchas variables del proceso, tanto químicas, termodinámicas, físicas y térmicas. Además, como es la última oportunidad para modificar la química del acero, esta se encarga de darle su composición química final [32, 40, 44 – 49]. Desde los 60s, la olla metalúrgica se convirtió en la técnica universal para el tratamiento del acero fundido [1, 20, 39].



Figura 1. La olla metalúrgica en el proceso real.

Este reactor está revestido de una capa de ladrillo aislante y ladrillo refractario en la superficie que está en contacto con el acero y se encarga de contener el acero fundido dentro de ella durante las operaciones de refinación, de tal modo que el acero llegue limpio al siguiente paso (colada continua) [40, 46]. Actualmente la olla se encarga de realizar una serie de operaciones metalúrgicas tales como [16, 20, 34 – 35, 46 – 48, 50]:

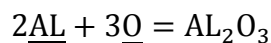
1. Eliminación de oxígeno (desoxidación).
2. Control de gases (desgasificación): consiste en la eliminación o reducción de componentes gaseosos disueltos como nitrógeno, oxígeno e hidrógeno.
3. Remoción de azufre, fósforo y carbono del acero líquido (desulfuración, desoxidación y descarburación).
4. Reducción del número de inclusiones no metálicas y modificación de su morfología: al no poder eliminar completamente a las inclusiones, estas se modifican en tamaño y forma para hacerlas compatibles con las propiedades mecánicas del acero final.
5. Control de la homogenización térmica y química del baño metálico, la cual es probablemente la misión más obvia y tradicional.
6. Adición de ferroaleaciones.

Además de lograr las funciones señaladas anteriormente, en algunos casos la olla se puede conectar a un sistema de vacío, para realizar la descarburación al vacío para la producción de aceros inoxidables de bajo carbono u otros grados de acero y aleaciones especiales [46]. Así, la olla permite la producción de aceros ultra bajos en carbono y grados libres de intersticios, una tecnología que a pesar de que adhiere costos de operación, trae altos beneficios en términos de la calidad y la consistencia del producto, ya que fortalece a la planta, convirtiéndose en una herramienta de operación estándar y actualmente los BOF y los EAF no se construyen sin un horno olla [48]. La olla agitada con gas es esencialmente un reactor complejo de tres fases el cual consiste en un flujo de recirculación de burbujas impulsadas que puede medir varios metros de diámetro [9].

2.2 Operaciones Metalúrgicas en la Olla

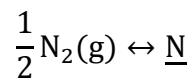
2.2.1 Desoxidación

Este es el tratamiento más importante realizado en el acero. El objetivo es disminuir el contenido de oxígeno (O) disuelto, ya que este puede provocar porosidad y formar inclusiones durante la solidificación. Además, una correcta desoxidación es condición necesaria para lograr una buena desulfuración del acero. La desoxidación se logra agregando un elemento con alta afinidad por el oxígeno. Esto significa que la variación de la energía libre de la reacción de oxidación de este elemento tiene que ser menor que la de la reacción de oxidación del hierro. Así mismo, este elemento debe ser compatible con la composición química del acero y ser viable económicamente. Hay distintos elementos que pueden usarse para desoxidar el acero: Mn, Si, Ti, Al, Ca y Mg. De todos estos elementos el que se utiliza con mayor frecuencia es el aluminio porque permite obtener bajos niveles de oxígeno en el baño (desoxidación profunda) con buen rendimiento industrial. En este caso la reacción de desoxidación puede plantearse [46]:

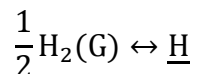


2.2.2 Desgasificación

La desgasificación está gobernada principalmente por las siguientes reacciones [46]:



$$K_{\text{N}} = \frac{\% \underline{\text{N}}}{\sqrt{P_{\text{N}_2}}}$$

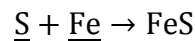


$$K_{\text{H}} = \frac{\% \underline{\text{H}}}{\sqrt{P_{\text{H}_2}}}$$

Se puede ver que para lograr la eliminación de los gases disueltos en el acero, es necesaria una baja presión parcial del gas. Cuanto mejor sea la presión parcial del gas menor será la concentración en equilibrio con el líquido. Cuando las burbujas de argón pasan a través del acero establecen un gradiente de composición con los gases disueltos en este último. De esta manera, los gases disueltos en el acero difunden hacia las burbujas de argón, que flotan hasta la superficie donde escapan a la atmósfera. El flujo de gas necesario para remover una cantidad dada de H y N disminuye considerablemente cuando decrece la presión exterior. Es por esta razón que se usan equipos de vacío para la desgasificación.

2.2.3 Desulfuración

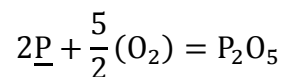
El azufre (S) es muy perjudicial en las propiedades de los aceros ya que durante la solidificación el azufre puede unirse con el hierro (Fe) dando lugar a la formación de FeS [46]:



Este sulfuro de hierro tiene un bajo punto de fusión (1188 °C) por lo que durante la laminación en caliente estos precipitados están líquidos, provocando la generación de desgarres en el producto laminado. Este problema se soluciona agregando manganeso (Mn) al acero, de manera que al solidificar, el azufre precipite como MnS. Estas inclusiones tienen un mayor punto de fusión que el FeS por lo que se encuentran solidas durante la laminación.

2.2.4 Desfosforación

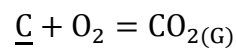
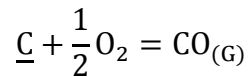
En este caso el fósforo en el metal fundido se oxida formando P_2O_5 como lo muestra la siguiente reacción [46]:



Este óxido es atrapado por el CaO presente en la escoria formando 4CaO y P_2O_5 . La reacción de desfosforación se favorece con un alto contenido de O en el acero, una escoria básica (alto contenido de CaO) y una temperatura relativamente baja.

2.2.5 Descarburación

El carbono (C) es eliminado por la formación de gases. La reacción de descarburación es favorecida inyectando O_2 en el horno mediante una lanza. Como muestran las siguientes reacciones, el carbono forma CO y CO_2 lo que provoca un burbujeo del metal líquido, fomentando las reacciones metal – escoria [46]:



2.3 Inyección de las Burbujas de Argón y Agitación

La agitación dentro de la olla es un factor muy importante en la determinación de la eficacia global de las operaciones de refinación y se puede llevar a cabo mediante la inyección de un gas inerte (usualmente argón) por la parte superior a través de lanzas rotatorias o por el fondo a través de tapones porosos. La variación en la posición de la inyección del gas determina el tipo de flujo que se forma dentro de la olla, el cual influye en mayor o menor grado sobre las características del mezclado. El gas ascendente utiliza la energía potencial para producir el mezclado durante su recorrido a la superficie, lo que promueve que se lleven a cabo las reacciones químicas requeridas, así como la transferencia de calor y masa. Los objetivos principales de esta operación son: homogenizar térmica y químicamente el acero fundido, mejorar la rapidez de las reacciones de refinación (eliminar los gases dañinos presentes en el acero), separar las inclusiones no metálicas, promover las interacciones en la interfase y alcanzar el sobrecalentamiento exacto en la colada. La agitación está en función del flujo de gas, el diámetro de la tobera, la posición y el ángulo de entrada y la cantidad de acero [1 – 4, 9 – 12, 15 – 16, 19, 21 – 22, 24 – 28, 30, 32 – 34, 36, 40, 44, 46 – 54].

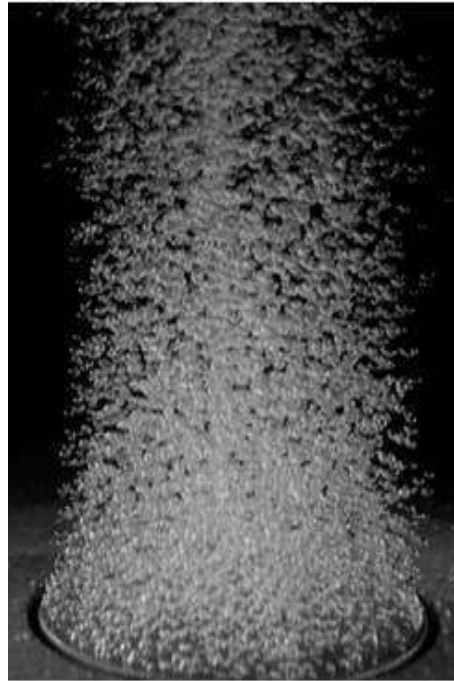


Figura 2. Jet de burbujas.

Cuando el argón es inyectado en el líquido, este viene en forma de burbujas. Estas burbujas de gas ascienden hasta la superficie del baño debido al efecto de las fuerzas de flotación y transfieren cantidad de movimiento al líquido de los alrededores, causando un complejo patrón de flujo turbulento inestable que se presenta en forma grandes recirculaciones en el baño, promoviendo el mezclado, por lo que el movimiento de estas burbujas es muy importante. Estas burbujas forman un jet vertical turbulento que no tiene una frontera libre entre las burbujas y el acero [4, 12, 20, 25, 49, 53].

El jet divide en 4 zonas físicas a la olla a lo largo de la dirección axial: la zona de burbujas primarias, la zona de burbujas libres, la zona de la pluma y la zona de entrada del medio de agitación, siendo las dos primeras donde el efecto de la energía cinética del gas está más pronunciado. Otros autores dividen la zona del jet en 3 regímenes: la de momento, la de transición y la de flotación y la de región superficial [46, 49, 52].

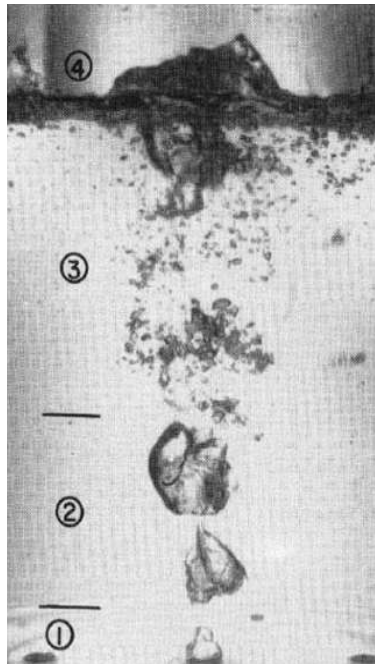


Figura 3. Regímenes de la dispersión del gas en el líquido 1) Régimen primario, 2) Régimen libre, 3) Jet y 4) Tapón.

El proceso de ascenso de las burbujas en el metal fundido incluye dos pasos: el primero es el ascenso de la burbuja dentro del líquido y el segundo es el ascenso de la burbuja cruzando la superficie líquida [53]. Un aspecto clave del proceso de agitación es la predicción del volumen de gas y el diámetro de la burbuja. El cálculo del tamaño de la burbuja es importante y esta se modifica significativamente con el sistema de inyección y la tasa de flujo de gas, además de que determina directamente las fuerzas de flotación y a la física del proceso. Una vez obtenido el tamaño de la burbuja, el jet de burbujas se forma exitosamente a la salida del medio poroso, para después ascender con la corriente y mezclarse con los alrededores del acero fundido [10].

2.4 Medios de Agitación

Un medio de agitación es una tobera de material refractario por el cual se inyecta el gas por el fondo de la olla. La inyección de gas a través de medios de agitación por la parte inferior de la olla proporciona: pocas zonas muertas, una agitación uniforme, acero limpio, la posibilidad de poder agitar el horno continuamente y por cualquier parte y bajos costos de

operación; sin embargo, esta operación puede causar un fuerte desgaste en las paredes del refractario, ya que ha sido reportado que los esfuerzos cortantes en las paredes son sensibles a la configuración del medio de agitación [1, 3, 6, 10, 46].



Figura 4. Medio de agitación direccional usado en el proceso real.

Las ollas industriales normalmente tienen uno o dos medios de agitación, dependiendo de su tamaño, y la posición de estos es crítica para lograr los beneficios esperados sobre la homogenización química y térmica y también sobre la interacción metal – escoria; sin embargo, el fenómeno del mezclado se vuelve complejo con la presencia de múltiples elementos de inyección y no es posible identificar claramente un número de elementos de inyección que proporcione un tiempo de mezclado más corto debido a que es un efecto combinado entre el número de medios de agitación, su posición radial y el flujo de gas [6].

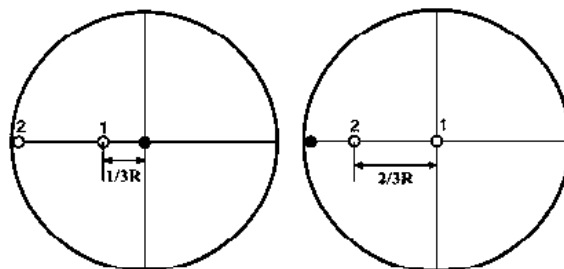


Figura 5. Diferentes arreglos de los medios de agitación usados en la industria y en la investigación. Actualmente un gran número de medios de agitación están disponibles en el mercado [33, 47]. Los medios de agitación se dividen en direccionales y no direccionales, tal y como lo muestran las Figuras 6 y 7. Los medios direccionales están diseñados para que el flujo de

gas suministrado entre a la olla a un ángulo deseado, de tal forma que sigan una dirección determinada, mientras que los no direccionales no muestran un cambio significativo en la trayectoria del flujo de gas [46]. El mal funcionamiento de los medios de agitación además de perjudicar el proceso, produce demoras operativas. Durante el servicio el medio sufre ciclos que le imponen desgaste, estos incluyen [32]:

- Infiltración del acero líquido durante el llenado de la olla.
- Adherencia de una capa de acero al medio, la cual luego se cuartea por enfriamiento (choque térmico) y se despega durante la agitación.
- Abrasión generada por el burbujeo.
- Corrosión por la escoria cuando la olla finaliza el vaciado a la máquina de colada continua.

Las fluctuaciones térmicas como consecuencia del calentamiento por el acero y el enfriamiento durante la agitación, ocasionan además micro fisuras favoreciendo la penetración de acero e impidiendo el paso del gas.

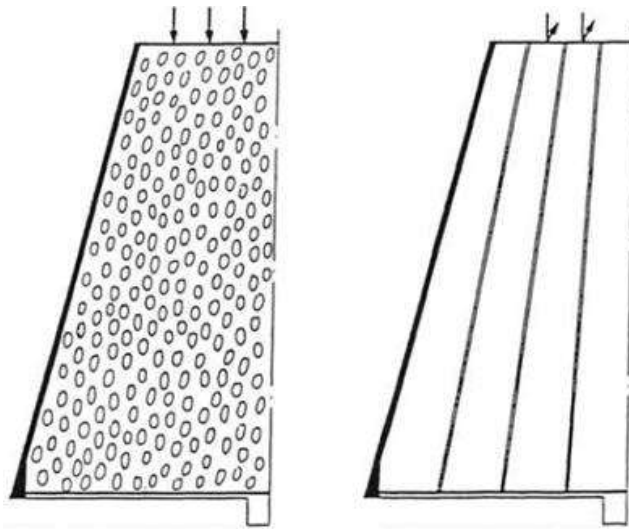


Figura 6. Medios para agitación: a) Poroso y b) Direccional.

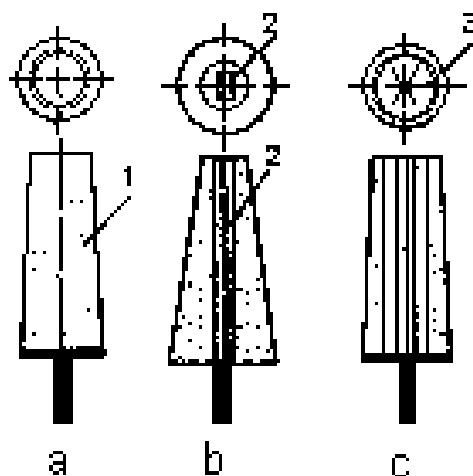


Figura 7. Medios para agitación: a) medio poroso, b) y c) medio poroso con canales direccionales.

2.5 Tiempos de Mezclado

Tradicionalmente la eficacia de la olla es cuantificada como el tiempo de mezclado, el cual está definido como el tiempo requerido para alcanzar un cierto grado de homogeneidad del gas inyectado en la olla, es decir, alcanzar una homogenización respecto a la composición química del 95 % [1 – 2, 4, 7 – 8, 13 – 14, 17, 20, 22, 27, 29 – 31, 34 – 35, 46, 55].

El mezclado es muy importante en el proceso de refinación del acero y su calidad depende de la velocidad del líquido en las zonas más inactivas de la olla, por lo que, en muchos casos, incrementar la rapidez de la circulación del acero líquido puede disminuir el tiempo de mezclado, siendo la tasa de flujo de gas el principal factor que determina esta circulación en el líquido. Además, se sabe que la inyección de gas a través de medios de agitación por el fondo de la olla es el método más efectivo y factible para acortar el tiempo de mezclado, siendo mejor cuando el fluido alcanza cierta homogeneidad en un tiempo más corto [2, 10, 31, 55].

El tiempo de mezclado depende de la tasa de flujo de gas, la altura y el diámetro de la olla y el diámetro del medio de agitación. Además, la forma de la olla, la posición y el número de

los medios usados y las propiedades físicas del líquido también influyen al tiempo de mezclado [11].

El tiempo de mezclado está dado por la siguiente ecuación [46]:

$$T(S) = 116\varepsilon^{-1/3}D^{5/3}H^{-1}$$

Un factor que tiene que ser muy tomado en cuenta en cualquier sistema de agitación con inyección de argón es la energía de agitación o de mezclado la cual está íntimamente relacionada con el tiempo de mezclado. La energía de agitación es la energía cinética y potencial que es inducida en el baño metálico ya sea por la inyección de un gas o por la simple acción del vaciado del acero líquido. La energía de agitación o de mezclado se puede medir en términos de W/m^3 o en W/T de metal. La energía generada durante el vaciado es muy limitada así que la única manera de hacerlo eficientemente es mediante la inyección de un gas inerte. La siguiente ecuación es utilizada para calcular la energía de agitación:

$$\varepsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1 + H}{1.48P_0} \right)$$

Dónde:

ε = energía de agitación, W/T

V = velocidad del flujo de gas, $N \cdot m^3/min$

T = temperatura del baño, K

M = peso del baño, Tonelada métrica

H = profundidad de inyección del gas, m

P_0 = presión de gas en la superficie del baño, atm

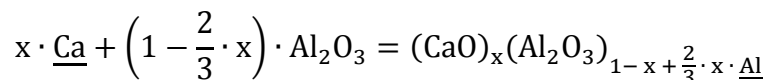
2.6 Remoción de Inclusiones

Uno de los problemas más grandes a los que se han enfrentado los productores de acero, ha sido el control de la limpieza del mismo, lo cual está íntimamente relacionado con las inclusiones no – metálicas, que además, se han presentado como un desafío a lo largo de la

historia en la fabricación del acero, ya que de ahí depende en gran medida su desempeño como producto [46].

Durante el proceso de fabricación de acero, un alto número de inclusiones no metálicas (oxígeno y nitrógeno) se quedan en la matriz del acero líquido y tienen un efecto nocivo sobre las propiedades de este, ya que son los principales sitios de fatiga, nucleación de grietas y corrosión, por lo que la remoción de estas inclusiones es crítico para la limpieza del producto. Debido a esto, la mejora en la eficiencia de este proceso se ha convertido en uno de los principales objetivos de la industria y es bien sabido que la inyección de argón ha sido usada ampliamente en el proceso de remoción siendo el principal responsable de la eliminación de inclusiones [13, 28 – 29, 45, 48, 50 – 51].

Una manera de eliminar inclusiones en los aceros calmados al aluminio es modificando la composición química de las inclusiones mediante el agregado de calcio. Para agregar el calcio se inyecta al acero líquido un tubo de acero en cuyo interior se encuentra polvo de CaSi compactado. Aunque hay diversos compuestos que pueden ser usados (AlCaSi, AlCaFe, etc.) el CaSi es el más común por su relación costo – rendimiento. A medida que el tubo ingresa en el acero, el calcio se evapora debido a su alta presión de vapor y parte de este vapor se disuelve en el acero, siendo este calcio disuelto el que modifica las inclusiones de alúmina de acuerdo a la reacción [46]:



La remoción de inclusiones mediante el soplado de argón ocurre principalmente en la región de la superficie líquida. Las inclusiones suben en el acero líquido y quedan atrapadas en la escoria debido al efecto de las fuerzas de flotación y a la turbulencia generada por el mezclado. Algunas de las inclusiones más pequeñas pueden llegar a la superficie y son removidas, mientras que las restantes se van al acero líquido. El atrapamiento de las inclusiones es conocido como mecanismo de flotación [28 – 29, 50 – 51]. Los mecanismos involucrados en la remoción de inclusiones son [50 – 51]:

- Las colisiones entre las inclusiones, las cuales pueden conducir a la agregación e incluso a la aglomeración de estas.
- La colisión entre inclusiones y burbujas, la cual conduce al mecanismo de flotación.
- El atrapamiento en la interfase entre el baño líquido y la capa de escoria.
- El atrapamiento en las paredes de la olla.

Se espera que una distribución de las burbujas sea buena para la remoción de inclusiones y la homogenización [10]. Por otro lado, el nivel de inclusiones en el acero debe ser de tal manera que este se deforme durante la laminación para evitar fracturas y la presencia de terceras fases que van a degradar la vida del producto. Estas inclusiones se usan para promover la nucleación de ferrita en los aceros al carbono (en la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$) para fomentar un tamaño de grano fino [48].

2.7 Apertura de la Capa de Escoria

Cuando el gas inyectado escapa a los alrededores y forma la pluma de gas y acero líquido en la región del flujo, esta sube a la superficie y presiona la capa de escoria, creando una abertura radial en la capa, lo que provoca que quede expuesta al ambiente una porción del metal conocida como “ojo”. El ojo es un sitio potencial para la re oxidación, ya que permite la entrada de oxígeno y nitrógeno al baño, pudiendo influenciar la calidad del acero profundamente. El movimiento relativo entre la escoria y el metal que fluye causa una inestabilidad en la interfase entre el acero y la capa de escoria, lo que conduce a la formación de gotas, fenómeno conocido como atrapamiento. Estas pequeñas gotas entran a la olla, siendo perjudicial para la calidad del acero. Durante la operación de la olla, cuando se da la apertura de la capa de escoria, conforme esta apertura se incrementa (debido a la inyección del gas), también se incrementa el espesor de la capa de escoria [1 – 2, 10 – 12, 15, 23 – 25, 48, 56].

Debido a esto, durante la refinación en la olla es necesario un flujo de gas adecuado para balancear la eficiencia del proceso y la limpieza del acero, esto es, un flujo relativamente calmado con burbujas pequeñas y sin abertura de la capa de escoria para la flotación de

inclusiones. Pero por otra parte, se necesita una agitación fuerte para promover la eficacia del mezclado; sin embargo, un ojo grande es indeseable para evitar la entrada de oxígeno y nitrógeno, el atrapamiento de escoria y la generación de inclusiones exógenas del refractario [10 – 12, 20, 50, 52].

El ojo de escoria incrementa cuando se incrementa la tasa de flujo de gas, pero disminuye cuando se incrementa el espesor de la fase líquida de escoria, debido a que más cantidad de la energía suministrada es disipada y como resultado, menos energía está disponible para crear el ojo. Dado esto, es razonable asumir que la viscosidad cinemática de la escoria influye sobre el área del ojo, ya que una mayor viscosidad tiende a disipar más energía de entrada debido a la disipación viscosa, llevando a ojos más pequeños. El grado de disipación de la energía va a depender por lo tanto del espesor de la capa de escoria y la intensidad del flujo de recirculación [56]. Pero para una rápida refinación en la olla es importante operar con escorias relativamente fluidas, lo que las hace más susceptibles a incrementar el área del ojo para mismos flujos de gas y por lo tanto más susceptibles a la oxidación del acero [6].



Figura 8. Apertura de la capa de escoria debido a la inyección de gas de dos medios porosos en el proceso real.

2.8 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad que tiene una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura. La conducción de la corriente eléctrica en el agua puede explicarse por medio de la disociación electrolítica: cuando se disuelve un ácido en agua, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos [57]:



Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico. La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los conductores metálicos obedecen a la Ley de Ohm, excepto en voltajes muy elevados y corrientes de frecuencia muy alta. La conductancia específica o conductividad σ es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y está definida por la relación [57]:

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

Dónde:

J: densidad de corriente.

E: carga eléctrica.

2.9 Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV)

La velocimetría de partículas por imagen (PIV por sus siglas en inglés) es una técnica de láser pulsátil doble que se usa para medir la distribución de velocidad instantánea en el plano de un flujo cuando se determina fotográficamente el desplazamiento de partículas en el plano durante un intervalo de tiempo muy breve [57].

Esta técnica permite medir velocidades en flujos complejos iluminando un plano en el modelo físico mediante un láser. Para iluminar el plano se suministran partículas trazadoras, de tal manera que al ser arrastradas por el fluido la luz se refleja sobre ellas y las materializa en una imagen, siendo esta capturada por una cámara de alta velocidad. Esto se hace enviando dos pulsos de corta duración a través del láser separados por unos nanosegundos, obteniéndose dos imágenes en dos instantes separados un intervalo de tiempo conocido Δt (seleccionado por el operador), conociendo así el desplazamiento de dicha partícula durante ese intervalo de tiempo Δt . Las dos fotografías se analizan dividiendo las imágenes en pequeñas subsecciones llamadas áreas de interrogación (IA). Las áreas de interrogación de cada imagen (I1 e I2) son procesadas píxel por píxel mediante un algoritmo de correlación cruzada, lo que permite obtener el desplazamiento del trazador [46, 57 – 58].

El programa proporciona un vector de velocidad para cada grupo de partículas desde una imagen inicial a una de un tiempo posterior, por lo que esta técnica ha sido calificada como una técnica de visualización cuantitativa, puesto que permite la visualización del flujo, aunque también ofrece una descripción precisa [57 – 58].

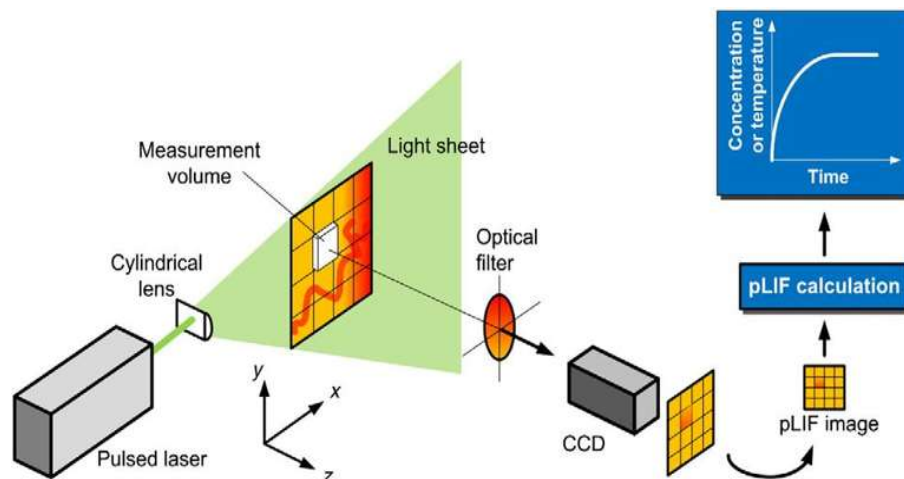


Figura 9. Esquema típico del PIV.

La técnica de PIV se ha utilizado desde mediados de los ochenta y su uso y capacidades han aumentado en años recientes con las mejoras en la tecnología de las cámaras. La precisión, flexibilidad y versatilidad de los sistemas PIV con su capacidad de capturar

imágenes de todo el campo con tiempo de exposición por debajo de los microsegundos, los ha convertido en herramientas extremadamente valiosas en el estudio de los diferentes tipos de flujos. Y además, debido a la capacidad de campo completo, el PIV también se usa para validar paquetes computacionales de dinámica de fluidos CFD [57]. Con el PIV también se pueden obtener otras propiedades del flujo, como la vorticidad y la turbulencia y los avances recientes en la tecnología han hecho posible obtener perfiles de velocidad tridimensionales en una sección transversal de un flujo con el uso de dos cámaras. Los sistemas PIV pueden usar diversas fuentes de luz láser: argón, vapor de cobre y Nd:YAG, dependiendo de los requisitos de la duración del pulso, potencia y tiempo entre pulsos [57].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Introducción a la Simulación Física

Las altas temperaturas y la nula visibilidad a través del acero líquido, hacen difícil y engorroso realizar mediciones de forma directa en la planta, así como imposible observar el fenómeno, por lo que una de las herramientas que ha resultado de mucha utilidad para simular fenómenos físicos es la modelación física, la cual permite simular el proceso de manera real con modelos que involucran sistemas de agua – aire contruidos de material transparente hechos a escala [1, 16 – 17, 23, 44 – 45, 49]. Esto se hace debido a que a escala de producción el equipo no está disponible para mediciones continuas [19]. Para que el modelo a escala sea válido tiene que haber una similitud entre este y el prototipo. La similitud de los fenómenos de flujo no solo ocurre entre el prototipo y su modelo, sino que, también puede existir entre varios fenómenos naturales si satisfacen estas leyes de similitud [57].

3.1.1 Criterios de Similitud en la Simulación Física

En los modelos físicos isotérmicos, donde no existe reacción química en el sistema, se requiere que el fluido dentro del reactor satisfaga los criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática, a los cuales se les asocia un determinado número adimensional. Para los sistemas en los cuales se desplaza un fluido se tienen los siguientes criterios de similitud [57, 59]:

- Similitud geométrica: dos sistemas son geoméricamente similares si la relación entre la longitud del sistema real y su correspondiente longitud en el modelo es la misma en cualquier sitio. Esta relación se denomina factor de escala.
- Similitud dinámica: es la que presenta la similitud de fuerzas. Dos sistemas presentan similitud dinámica cuando las magnitudes de las fuerzas en puntos y tiempos correspondientes en cada sistema se encuentran en relación fija. Estas fuerzas incluyen fuerzas concentradas, distribuidas y momentos. Si las razones de

combinaciones de estas fuerzas son idénticas para los dos sistemas se dice que son dinámicamente similares respecto a las fuerzas involucradas.

- Similitud cinemática: se refiere a la similitud del movimiento del fluido. Los patrones de flujo deben ser similares en ambos sistemas. Las variables involucradas en este caso son la longitud y el tiempo (las fuerzas no forman parte de esta). Este criterio abarca desplazamientos lineales y angulares, velocidades y aceleraciones.

3.1.2 Análisis Adimensional

La similitud dinámica se puede asegurar de manera fácil satisfaciendo los números adimensionales de Reynolds y Froude modificado [44, 60]. Es ampliamente aceptado que el complejo flujo multifásico inducido por el momento del gas inyectado en los modelos físicos esta dictado solamente por la similitud del número de Froude modificado, a través del cual se usa una ecuación de escalamiento cuantitativa. En esta, conociendo la proporción geométrica (λ_L) entre el modelo y el prototipo, se puede determinar la tasa de flujo de gas (Q') de un modelo físico con respecto a la del prototipo (Q) [44, 52]. El número de Froude modificado es por tanto elegido como criterio de diseño ya que toma en cuenta las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación que son las que gobiernan el comportamiento del flujo en el caso de estudio [61]:

$$Fr_m = \frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g)gL}$$

Para que la similitud se cumpla es necesario que el valor del número de Froude sea similar para el prototipo y el modelo, esto es:

$$Fr_{mp} = Fr_{mm}$$

$$\left(\frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} \right)_p = \left(\frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} \right)_m$$

Para hacer el análisis adimensional de los números de Froude del modelo y del prototipo y demostrar la factibilidad del escalamiento, es necesario conocer los valores de las

propiedades de los fluidos usados en la modelación para usarlas en los cálculos. Estos valores se muestran en la tabla 1. En el modelo se usó agua para modelar el acero ya que la viscosidad cinemática del agua a 20° y la del acero a 1,600° son equivalentes. Los parámetros de operación del prototipo y del modelo se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Propiedades de los fluidos del prototipo y del modelo.

Propiedad	Acero a 1,600° C	Argón a 25° C	Agua a 25° C	Aire a 25° C
Densidad (ρ) (kg/m ³)	7,000	1.66	1,000	1.29
Viscosidad (μ) (Pa · s)	0.0064	2.1×10^{-5}	0.89×10^{-3}	1.8×10^{-5}
Viscosidad Cinemática (ν) (m ² /s)	0.91×10^{-6}	0.13×10^{-6}	0.89×10^{-6}	0.14×10^{-6}

Tabla 2. Dimensiones del prototipo y del modelo.

Dimensión	Prototipo (mm)	Modelo (mm)
Diámetro interno de la olla (D)	2,600	371
Altura del baño líquido (H)	3,190	456
Diámetro del tapón poroso (d)	109	15.6

Con los valores de las tablas se puede calcular el número de Froude para el prototipo:

$$Fr_{mp} = \frac{(1.66 \text{ kg/m}^3) \times (\nu)^2}{(7,000 \text{ kg/m}^3 - 1.66 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) \times (3.193 \text{ m})}$$

En este caso no se conoce la velocidad del prototipo, pero se puede calcular mediante la fórmula del caudal en una tubería:

$$\text{Caudal} = \text{Área} \times \text{Velocidad}$$

Despejando la velocidad:

$$v_p = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

Dónde:

v = velocidad de entrada del fluido

Q = flujo de gas

d = diámetro del medio de agitación

La empresa proporcionó un valor del caudal de 1,500 l/min para el prototipo, por lo que la velocidad en metros por segundo queda:

$$v_p = \left(\frac{4}{\pi}\right) \left(\frac{1}{(0.109 \text{ m})^2}\right) \left(1.5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)$$

$$v_p = 2.68 \text{ m/s}$$

Con la velocidad ahora se calcula el número de Froude para el prototipo:

$$Fr_{mp} = \frac{(1.66 \text{ kg/m}^3) \times (2.68)^2}{(7,000 \text{ kg/m}^3 - 1.66 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) \times (3.193 \text{ m})}$$

$$Fr_{mp} = 5.4389 \times 10^{-5}$$

Ahora calculando el número de Froude para el modelo:

$$Fr_{mm} = \frac{(1.29 \text{ kg/m}^3) \times v^2}{(1,000 \text{ kg/m}^3 - 1.29 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) \times (0.4561 \text{ m})}$$

En este caso tampoco se conoce la velocidad del modelo, pero también se puede calcular de la misma forma que como se hizo para el prototipo:

$$v_m = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

$$v_m = \frac{4Q}{\pi(0.0156)^2}$$

Una vez más no se conoce el flujo de gas para el modelo; sin embargo, este se puede conocer mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^2 = \left(\frac{\rho_{\text{gas}(p)}}{\rho_{\text{gas}(m)}}\right) \left(\frac{\rho_{\text{líquido}(m)}}{\rho_{\text{líquido}(p)}}\right) \left(\frac{d_m}{d_p}\right)^4 \left(\frac{H_m}{H_p}\right)$$

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^2 = \left(\frac{1.66 \text{ kg/m}^3}{1.29 \text{ kg/m}^3}\right) \left(\frac{1,000 \text{ kg/m}^3}{7,000 \text{ kg/m}^3}\right) \left(\frac{0.3714 \text{ m}}{2.6 \text{ m}}\right)^4 \left(\frac{0.4561 \text{ m}}{3.193 \text{ m}}\right)$$

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^2 = 1.0933 \times 10^{-5}$$

$$Q_m = 3.3065 \times 10^{-3} \times Q_p$$

$$Q_m = (3.3065 \times 10^{-3}) \left(1,500 \frac{\text{l}}{\text{min}}\right)$$

$$Q_m = 4.95 \text{ l/min}$$

Con este flujo se calcula la velocidad:

$$v_m = \left(\frac{4}{\pi}\right) \left(\frac{1}{(0.0156 \text{ m})^2}\right) \left(\frac{4.95 \text{ lts}}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ lts}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)$$

$$v_m = 0.4316 \text{ m/s}$$

Ahora sí, calculando el número de Froude para el modelo:

$$Fr_{mm} = \frac{(1.29 \text{ kg/m}^3) \times (0.4316 \text{ m/s})^2}{(1,000 \text{ kg/m}^3 - 1.29 \text{ kg/m}^3) \times (9.81 \text{ m/s}^2) \times (0.4561 \text{ m})}$$

$$Fr_{mm} = 5.3775 \times 10^{-5}$$

Como se puede ver, hay una diferencia del 1.13 % en los valores calculados entre el prototipo y el modelo, por lo que se puede decir que el modelo y el prototipo tienen similitud dinámica. Además, se puede observar que las fuerzas de flotación tienen un valor muy alto en comparación con las inerciales.

El número de Reynolds es la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas y está dado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{v\rho L}{\mu}$$

Y al igual que con el número de Froude, los valores calculados para el modelo y el prototipo deben ser similares:

$$Re_p = Re_m$$

$$\left(\frac{v\rho L}{\mu}\right)_p = \left(\frac{v\rho L}{\mu}\right)_m$$

$$Re_p = \frac{\left(2.68 \frac{m}{s}\right) \left(7,000 \frac{kg}{m^3}\right) (2.6 m)}{\left(0.0064 \frac{kg}{m \cdot s}\right)}$$

$$Re_p = 7.6213 \times 10^6$$

$$Re_m = \frac{\left(0.4316 \frac{m}{s}\right) \left(1,000 \frac{kg}{m^3}\right) (0.3714 m)}{\left(0.00089 \frac{kg}{m \cdot s}\right)}$$

$$Re_m = 0.1801 \times 10^6$$

Los valores del número de Reynolds no coinciden para el prototipo y para el modelo. Esto indica que el efecto de las fuerzas inerciales es mucho mayor en comparación a las fuerzas viscosas; sin embargo, el número de Froude mostró que estas fuerzas no tienen gran efecto en comparación a las fuerzas de flotación, por lo que esto no es tomado en cuenta para la similitud. De este modo, los flujos para el prototipo y el modelo se muestran en la tabla 3.

3.2 Construcción del Modelo Físico

Para la construcción del modelo de agua se usó como prototipo la olla de una empresa siderúrgica de 135 toneladas, a la que se le suministra un caudal de $1,500 \text{ Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Para el modelo se eligió un factor de escala de 1:7 y se construyó en acrílico de 4.5 mm de

espesor. La Figura 10 muestra los planos del prototipo utilizados para la construcción del modelo, tanto para la olla, Figura 10a), como para el medio de agitación, Figura 10b).

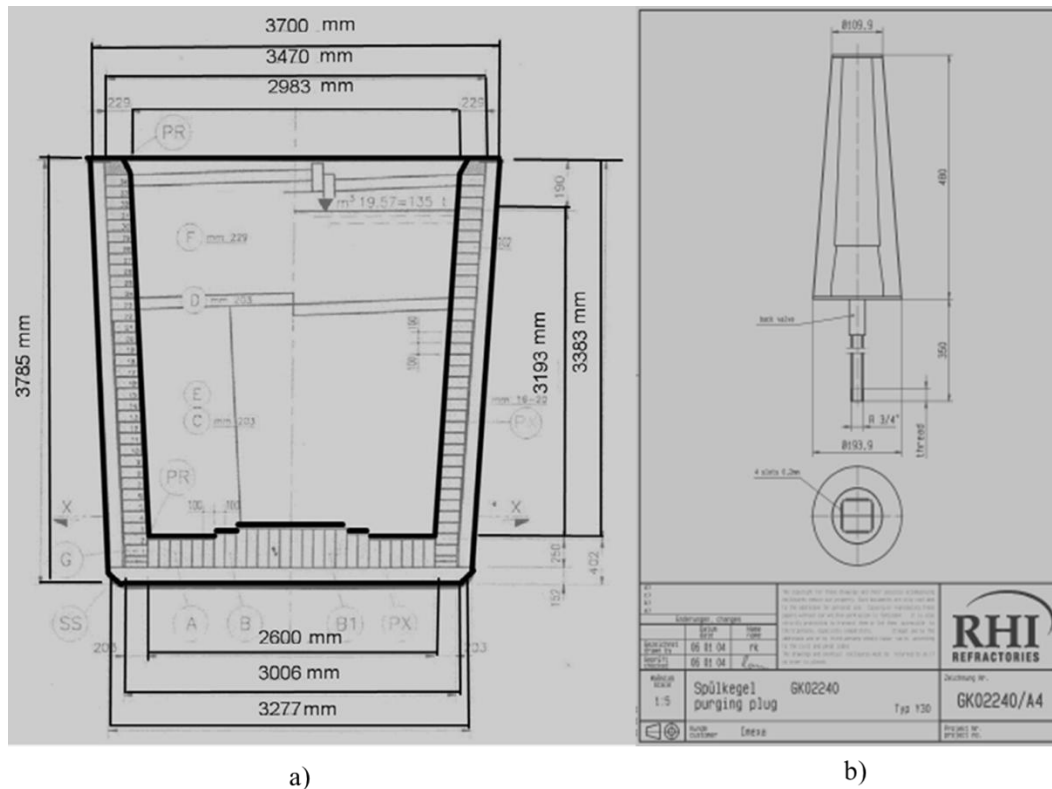


Figura 10. Geometría del prototipo: a) olla y b) medio de agitación.

Del número de Froude, se obtuvo un valor de entrada del flujo de aire para el modelo de 4.9 l/min cuando se tiene un tapón y de 2.45 l/min cuando se tienen 2 taponos. La energía de agitación se suministra mediante la inyección de aire a través del fondo de la olla, a través de toberas circulares, tal y como se muestra en la Figura 11a). En este trabajo se utilizan dos configuraciones de inyección: la primera consiste en una inyección de aire (entrada B) colocada a 0.75R (0.75 o 3/4 de distancia desde el centro de la olla a la pared). La segunda corresponde a una inyección dual de aire (entradas C y D) colocadas a 0.66 R (0.66 o 2/3 de distancia desde el centro de la olla a la pared) con un ángulo de separación de 60° entre ellas. Estas toberas se encuentran debajo de la parte inferior de la olla y el esquema de estas configuraciones se muestra en la Figura 11b). Estas configuraciones fueron seleccionadas debido a que en un estudio previo [1, 57] presentaron los mejores resultados entre 5 configuraciones diferentes.

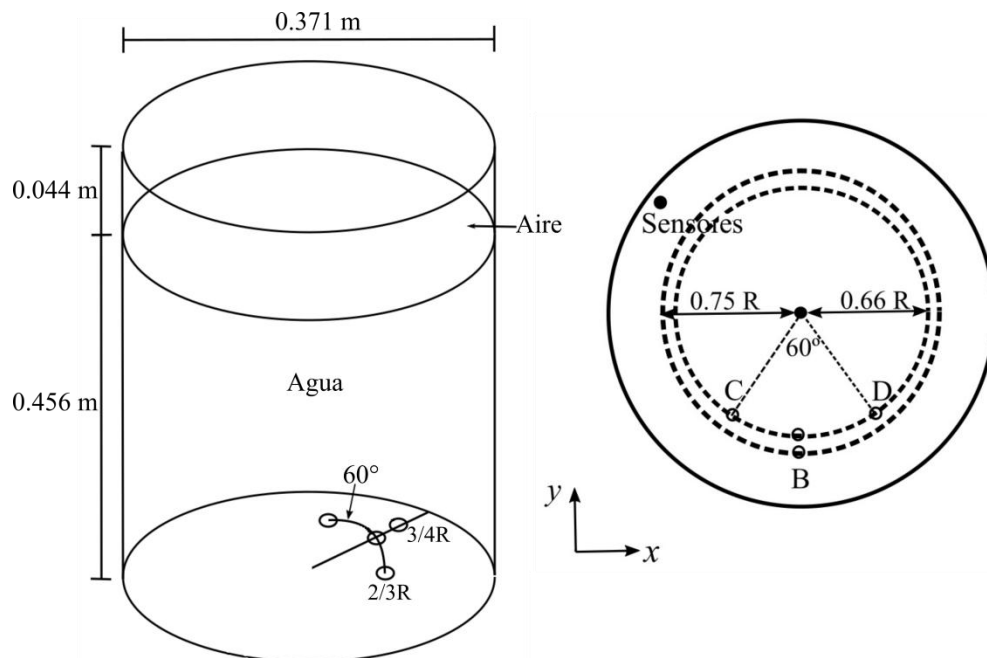


Figura 11. Arreglos de las toberas en el modelo físico: a) modelo visto en isométrico y b) vista superior.

3.3 Inyección del Aire con Modificadores de Flujo

Para generar un flujo tangencial dentro de la olla, se modificó el diseño de los canales por los cuales asciende el gas en el medio de agitación, ya que usualmente los medios porosos y direccionales no generan este tipo de flujos. Los diseños propuestos para la experimentación fueron usados por Urbina y colaboradores [46] en simulaciones matemáticas de la olla. A estos dispositivos los llamaron “modificadores de flujo”.

Los “modificadores de flujo” son cilindros con canales ranurados que presentan un ángulo de inclinación del lado superior con respecto al inferior a través de los cuales circula el aire, de tal forma que este entre a la olla en forma tangencial. Miden 15.6 mm de diámetro y 70 mm de altura. Un esquema de la parte superior del modificador se muestra en la Figura 12.

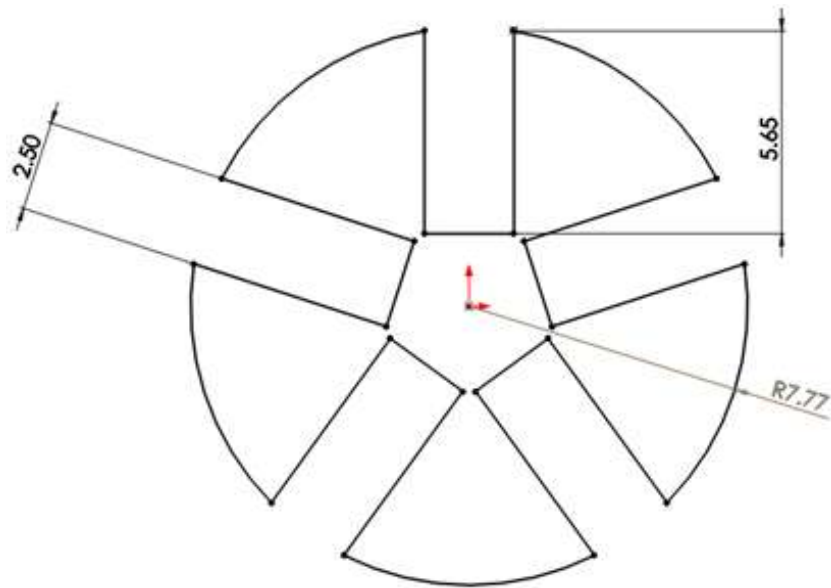


Figura 12. Vista superior de los canales del modificador de flujo.

Para la experimentación se diseñaron y construyeron 5 tapones en espiral con diferente ángulo de inclinación: 30° , 60° , 90° , 120° y 180° . Los modificadores fueron diseñados con el software Solid Works y posteriormente construidos en una impresora 3D Rostock V2 SeeMe CNC con material PLA mediante un código G con el software CURA. Estos dispositivos se muestran en la Figura 13 y fueron colocados al interior de las toberas.

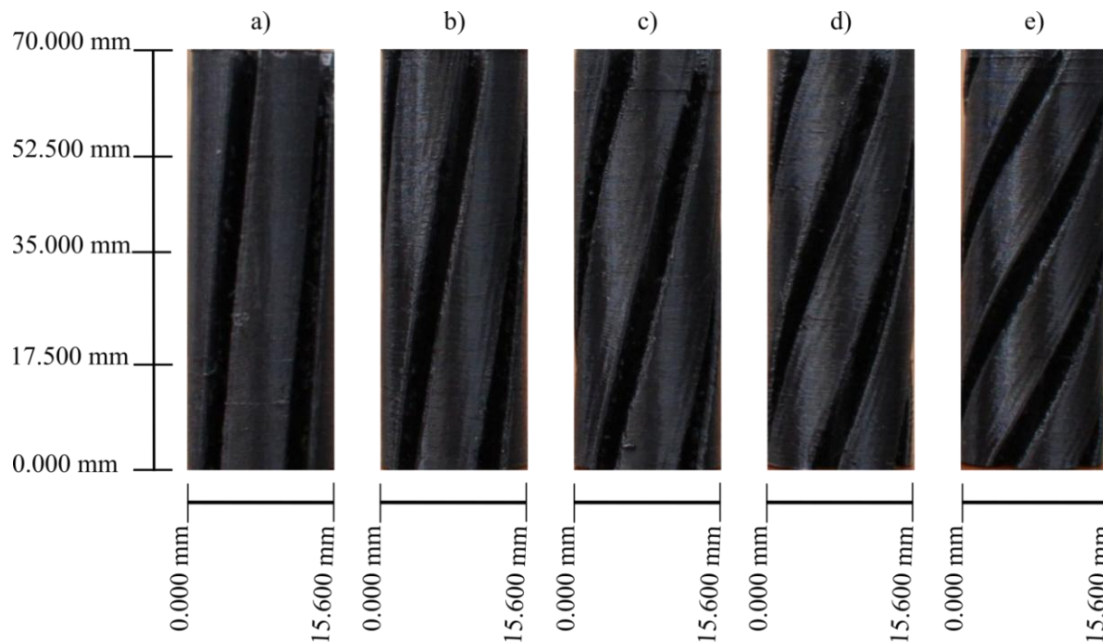


Figura 13. Modificadores de flujo de diferentes ángulos propuestos por Urbina y colaboradores [46]: a) 30° , b) 60° , c) 90° , d) 120° y e) 180° .

Cada uno de estos modificadores se probó en una posición cercana al centro en el fondo de la olla (debido a la imposibilidad de colocarlo en el centro ya que el centro se utiliza para la inyección del trazador) con el fin de reducir el efecto de las paredes de la olla sobre el flujo y poder cuantificar de forma más eficaz la distribución de velocidad del fluido a medida que sale de los modificadores. Posteriormente, se obtuvieron los campos de velocidad en un plano transversal a la mitad de la altura del modelo mediante la técnica de PIV. Finalmente, con un análisis estadístico de las magnitudes de las velocidades en el plano, se determinó que los modificadores de flujo con ángulos de torsión de 60° y 120° fueron los que presentaron una mejor distribución de las velocidades.

3.4 Obtención de los Tiempos de Mezclado Mediante la Técnica de Conductividad Eléctrica

3.4.1 Detección de las Zonas de Baja Velocidad en la Olla

Se ha reportado que el tiempo de mezclado es dependiente de la posición de los sensores de medición [5, 23, 35, 62], de la posición del trazador usado [14, 20, 23] y de su concentración [23]; sin embargo, esto solo es aplicable para el tiempo de mezclado local de la olla. El tiempo de mezclado obtenido en las zonas de baja velocidad está definido como el tiempo de mezclado de la olla [1, 4, 23, 27, 29]. Por esta razón, se caracterizó la fluido dinámica de la olla para encontrar las zonas de baja velocidad mediante pruebas de colorimetría.

En estos experimentos se inyectó al agua una solución de colorante vegetal que funciona como sustancia trazadora (la cual no interfiere con la fluido dinámica del sistema). Al observar la trayectoria del colorante dentro del líquido es posible detectar las zonas de baja velocidad dentro de la olla, las cuales servirán como punto de colocación de los sensores de conductividad. El trazador tiene una concentración de 35 g/l y se usaron 35 ml de trazador para cada experimento.

Las Figuras 14 y 15 muestran una serie de fotografías obtenidas de los videos que se tomaron de la experimentación. En estas se puede observar las trayectorias que sigue el trazador dentro de la olla a diferentes tiempos después de haber sido inyectado cuando se tiene 1 tobera colocada a $0.75R$. Para hacer este análisis se observó cómo el trazador se mezcla en la olla y posteriormente detectar la posición de las zonas de baja velocidad que se encuentran al interior de esta. Estas posiciones fueron elegidas para la colocación de los 2 sensores de medición de conductividad.

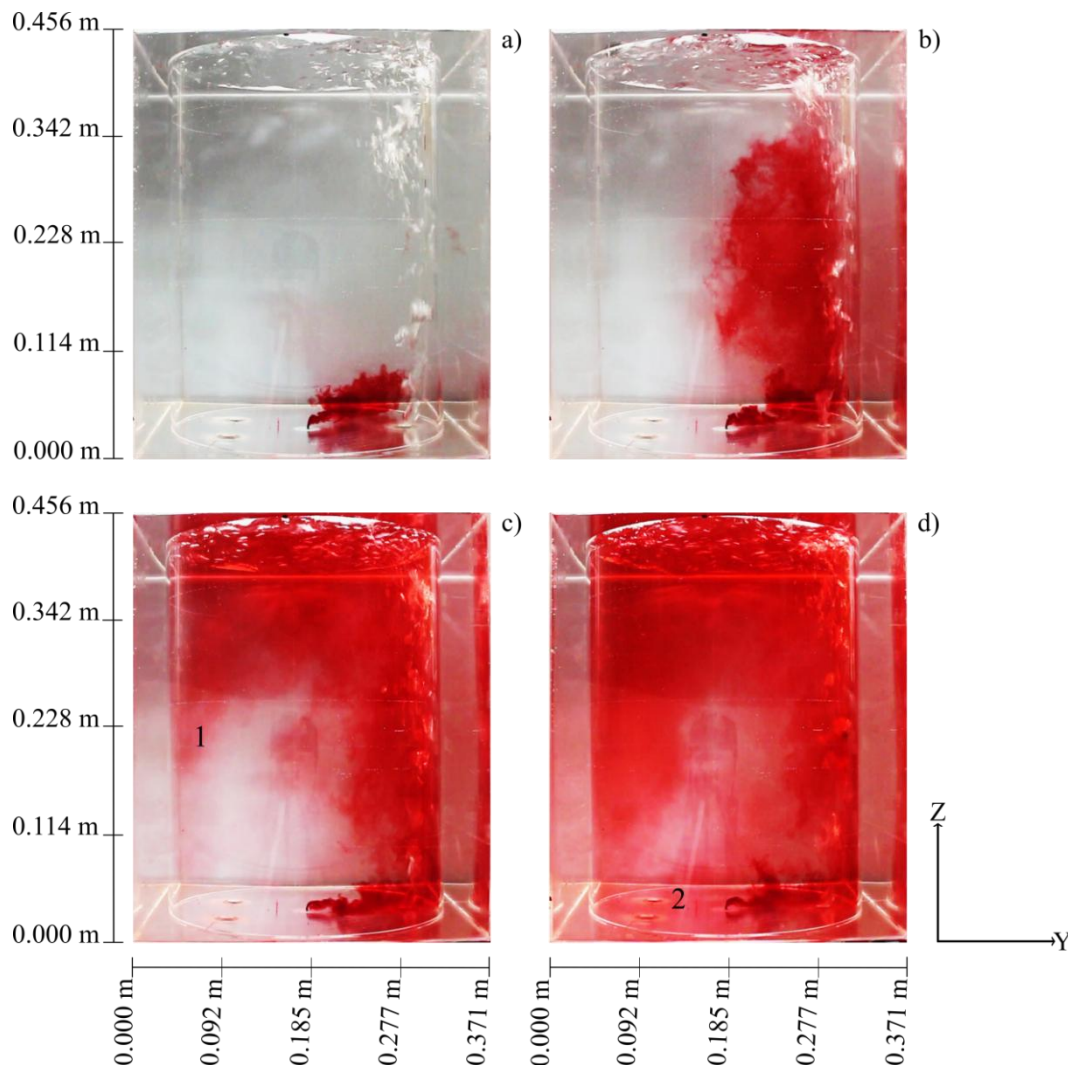


Figura 14. Vista lateral de la inyección del trazador para el caso de 1 tobera colocada a $0.75R$ y un flujo de 4.9 l/min . a) 2 segundos, b) 6 segundos, c) 9 segundos y d) 11 segundos.

En la Figura 14 se muestra una vista lateral de cómo se mezcla el trazador al interior de la olla y en ella se puede apreciar como el trazador que sale del fondo de la olla asciende con

el jet de burbujas a través de la pared después de que este es inyectado (14a – 14b). Cuando el trazador choca contra la superficie libre, cambia de dirección dirigiéndose hacia la pared opuesta, formando una recirculación (14c – 14d). En la Figura 14c) se observa como el trazador cubre la zona baja de la olla, acercándose desde arriba a través del costado (1), por lo que se podría predecir que la zona donde tarda más en llegar el colorante es a $0.5R$ en el lado opuesto a la inyección (ver número 2 en la Figura 14d).

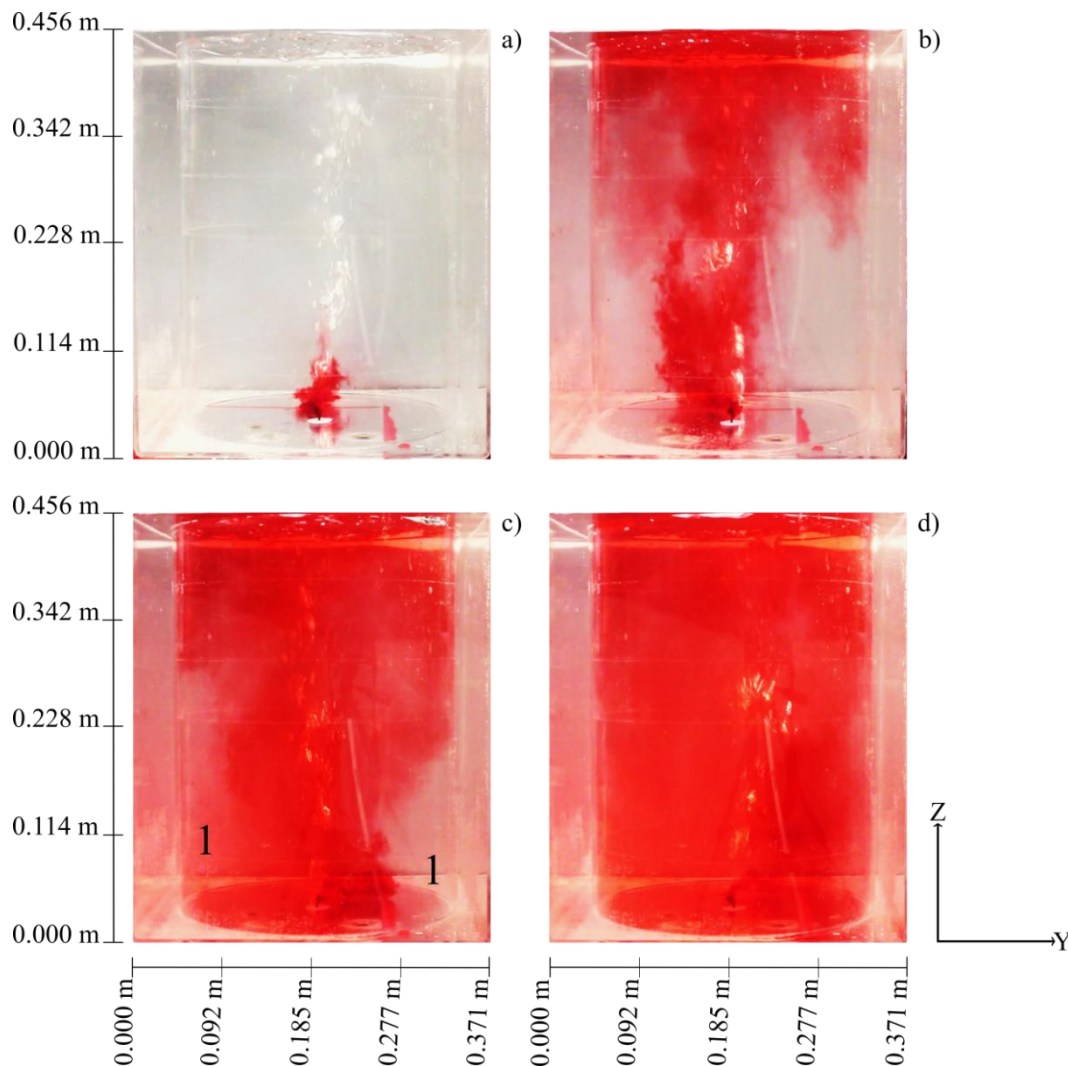


Figura 15. Vista frontal de la inyección del trazador para el caso de 1 tobera colocada a $0.75R$ y un flujo de 4.9 l/min . a) 2 segundos, b) 6 segundos, c) 9 segundos y d) 11 segundos.

Para comprobar que la suposición acerca de la posición donde se ubican las zonas de baja velocidad es correcta, se grabó un video de la vista frontal de la inyección, la cual se muestra en la Figura 16. En las Figuras 15a – 15b se observa como el trazador asciende con

el jet hasta la superficie, tal y como sucedió en la vista anterior. Cuando el trazador comienza a avanzar hacia adelante formando la recirculación en la Figura 14c, se inicia un descenso por las paredes en la Figura 15c. Esto indica que el líquido este se expande de manera proporcional a través del radio de la olla, es decir, que se difunde en cantidades iguales a través de las direcciones radial y axial. En la Figura 15d se ve que cuando el trazador comienza a descender a través del plano perpendicular a la inyección, la zona de la olla que más tarda en alcanzar es a $0.5R$, tal y como se había observado en la vista anterior (ver número 1 en la Figura 15c).

Estos experimentos también se llevaron a cabo para los otros arreglos, obteniéndose resultados similares. Cuando se hicieron los experimentos del arreglo donde se tienen 2 toberas, se observó un comportamiento del fluido bastante similar al analizado en los arreglos con 1 tobera, con la única diferencia de que el trazador se difunde ligeramente más lento cuando hay 2 toberas. Esto se debe muy probablemente a que al dividir el flujo en 2, la energía que originalmente iba en una sola pluma ahora se divide en 2, provocando una desaceleración en la velocidad del flujo y por tanto en movimiento del trazador al interior de la olla. Debido a esto, al trazador le toma más tiempo en alcanzar las mismas zonas de la olla cuando se tienen 2 toberas; sin embargo, la diferencia entre estos tiempos fue muy pequeña.

Por lo tanto, debido a que en los 2 arreglos las zonas de baja velocidad fueron muy similares, la colocación de los sensores fue la misma para todos los experimentos, ya que además, este comportamiento también se observó en los experimentos de colorimetría cuando se usaron los modificadores de flujo. Esta posición en la olla está a 135° respecto del plano central donde se encuentra la inyección del aire. Esta posición se observa en la Figura 16.

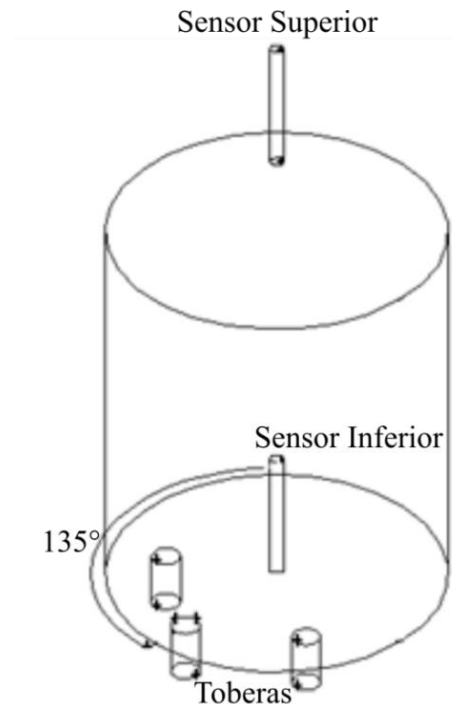


Figura 16. Posición de los sensores.

3.4.2 Medición de los Tiempos de Mezclado

De los varios métodos reportados en la literatura, los métodos basados en las mediciones de conductividad eléctrica son quizás los más convenientes, por lo que esta técnica de medición experimental es una de las más usadas para medir el tiempo de mezclado en modelos de agua. Esta técnica consiste en llenar la olla con agua para después inyectarle un trazador que mide el tiempo requerido para la homogenización de la fase líquida. Con esta técnica se puede observar el comportamiento del fluido dentro del modelo de agua y proporciona directamente la información sobre la eficacia de la agitación [4, 9, 46, 50, 63].

Para las mediciones del tiempo de mezclado se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se llenó la olla con agua hasta la superficie libre, dejando una distancia de 4 centímetros para evitar el derramamiento del líquido durante los experimentos.
2. Se colocaron dos sensores con electrodo de grafito, constante de celda $k = 1$ y errores de $\pm 1 \%$ para medir conductividad eléctrica Oakton CON110 en las posiciones donde se detectaron las zonas de baja velocidad en las pruebas de colorimetría, es decir, a 135° de la tobera. Estos sensores se conectaron a 2

medidores de conductividad eléctrica que leen la conductividad de 0 a 199.9 ms en 5 rangos. La señal fue adquirida cada segundo hasta que terminó el experimento. La colocación de los sensores se hizo con el fin de ir monitoreando los cambios de la concentración entre el punto donde se detectaron las zonas muertas y su contraparte en la superficie libre, siendo ambos electrodos colocados lo más cerca posible a la pared y su esquema se muestra en la Figura 16.

3. Antes de empezar cada experimento se inyectó aire a presión constante al agua por un tiempo de alrededor de 5 minutos para crear la agitación en la olla y asegurar un patrón de flujo estable. Para esto se utilizaron 2 flujómetros Cole Palmer con una capacidad de 0 a 5 l/min y una exactitud de 0.1 l/min.
4. Se adhirió una solución saturada de KCL y agua destilada con una concentración molar de 3.35 M (100 ml de agua por 25 gr de KCL) como trazador por el centro del fondo de la olla a través de una manguera de plástico de 1/8" la cual era alimentada por una pipeta graduada en la cual, por diferencia de presiones, el líquido se introduce a la olla a una baja velocidad, favoreciendo el arrastre del trazador por las fuerzas inerciales.
5. Cada conjunto de experimentos se repitió 7 veces (eliminándose los 2 valores extremos) y tomando el valor promedio de las 5 pruebas restantes como resultado final.
6. El tiempo de mezclado fue determinado considerando el criterio del 95 % de la homogenización.
7. Los datos obtenidos fueron enviados a un sistema de adquisición de datos (modelo RS232) y posteriormente a la computadora. De estos datos se obtuvieron las gráficas del tiempo de mezclado.

El sistema de instrumentación utilizado en los experimentos del tiempo de mezclado se muestra en la Figura 17.

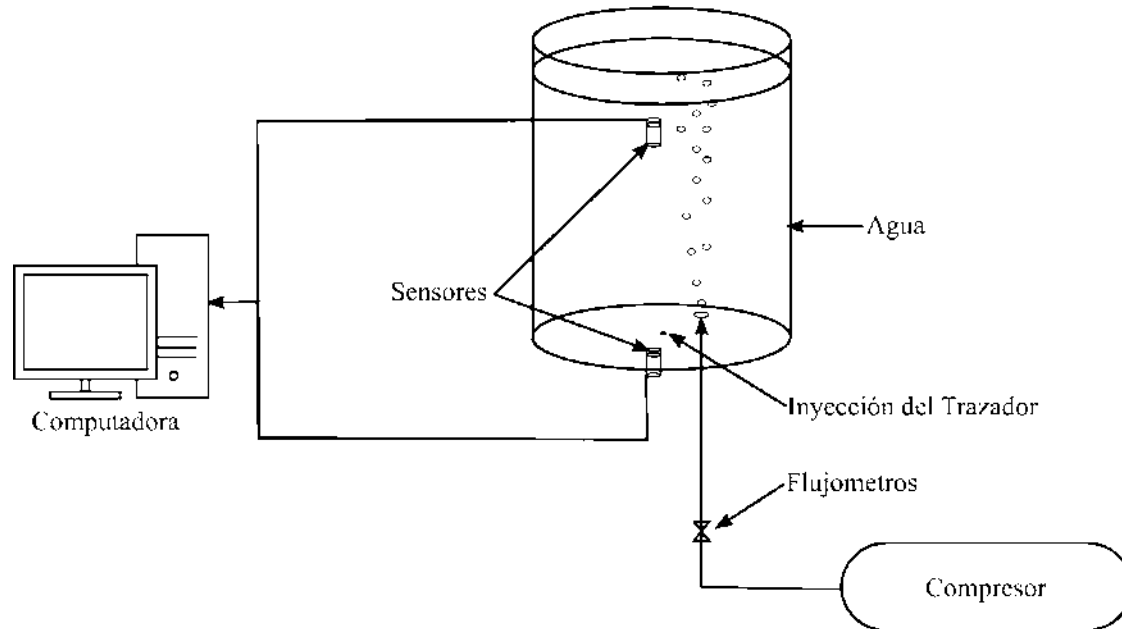


Figura 17. Arreglo experimental usado en los experimentos de los tiempos de mezclado.

3.5 Obtención de los Campos de Velocidad Mediante la Técnica de PIV

Para la obtención de los campos de velocidad del flujo, líneas de corriente e intensidad de turbulencia se empleó la técnica de PIV (Velocimetría de Partículas por Imagen). El PIV utilizado fue un sistema de velocimetría por análisis de partículas de dos componentes de velocidad con alta resolución temporal (modelo $tr - piv - 2d$) con una fuente laser DualPower 30 – 1,000 con pulsos de energía de hasta 2×30 mJ y 20 kHz, de la marca Dante Dynamics, el cual utiliza la óptica 80x80 high power light sheet series para formar el plano.

Además, una cámara de alta velocidad Speed Sense Phantom Miro M310 capaz de grabar 650,000 imágenes por segundo a una resolución de 64×8 , y a 3260 imágenes por segundo a una resolución de 1280×800 fue usada en los experimentos. Esta utiliza un sensor CMOS con tamaño de pixel de $20 \mu m$ y 12 bits de profundidad con una memoria máxima para grabación de 12 Gb.

Para llevar a cabo los experimentos se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se llenó la olla con agua hasta la superficie libre, dejando una distancia de 4 centímetros para evitar el derramamiento del líquido durante los experimentos. Adicionalmente, para evitar la distorsión óptica en los campos de velocidad debido a la forma circular de la olla, el modelo físico se colocó dentro de un recipiente cuadrado de acrílico el cual también fue llenado con agua durante los experimentos.
2. Se suministraron partículas de poliamida de $20\mu\text{m}$ las cuales tienen una densidad similar a la del agua en una proporción tal que estas pudieran reproducir el movimiento del agua.
3. Antes de pulsar el láser, se inyectó aire a presión constante al agua por un tiempo de alrededor de 5 minutos para asegurar un patrón de flujo estable y que las partículas se distribuyeran en todo el recipiente.
4. Se seleccionó el plano central por donde se inyecta el aire para la obtención de los vectores de velocidad. La frecuencia usada en el láser fue de 500 Hz.
5. Se hizo una calibración en los experimentos para obtener la escala de medición.
6. Para cada experimento con el PIV se tomaron 1,000 imágenes en 2 segundos de tiempo real.
7. Para el análisis de las fotografías se utilizó una correlación cruzada, dividiendo el plano en áreas de interrogación de 32×32 píxeles.
8. Posteriormente, mediante un método estadístico se obtuvieron los promedios de las velocidades.

El sistema de instrumentación utilizado para la obtención de los campos de velocidad se muestra en la Figura 18.

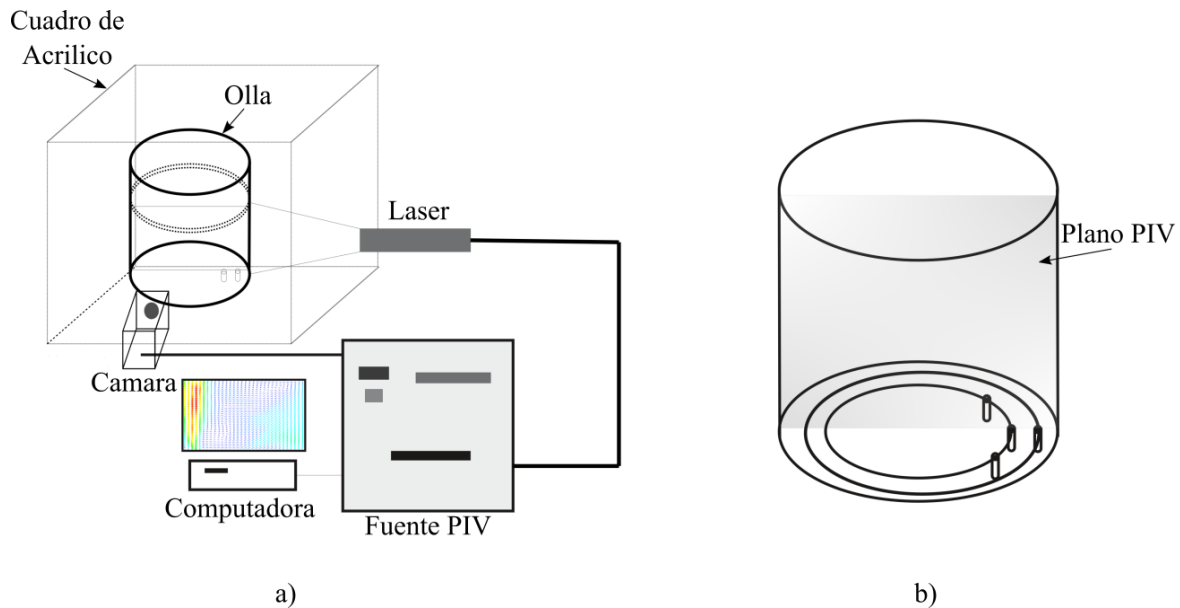


Figura 18. Sistema de instrumentación del PIV.

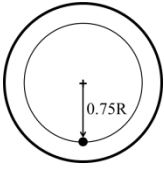
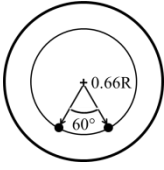
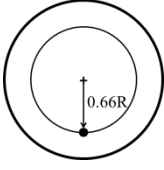
3.6 Arreglos Estudiados

En la primera etapa del trabajo se analizaron 3 arreglos diferentes de toberas. Los primeros 2 arreglos (1 tobera colocada a $0.75R$ y 2 toberas colocadas a $0.66R$) fueron elegidos debido a que estos mostraron los mejores resultados en un trabajo previo donde se analizaron 5 arreglos diferentes [57]. Por otro lado, el tercer arreglo se eligió para poder hacer una comparación de los resultados del número de toberas y la posición radial y observar el efecto de estas 2 variables sobre el tiempo de mezclado.

Posteriormente, se compararon con los resultados obtenidos de los casos con modificadores en términos del tiempo de mezclado y la fluido dinámica del sistema.

Además de los valores escalados, se eligieron 4 flujos más para la obtención de los tiempos de mezclado, los cuales se encuentran por debajo y por encima de los valores escalados. Estos flujos se analizaron para los 3 arreglos de toberas, mientras que para los 2 arreglos con modificadores de flujo y los 2 arreglos con inyección lateral de aire se analizaron solo el flujo de 4.9 l/min , siendo este el flujo que se utiliza en la planta. Todos los casos estudiados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Casos de estudio.

Caso	Tipo de inyección	Flujo (l/min)	Configuración
1 Entrada de aire.	1 Tobera	4.9	
	1 Modificador de flujo a 60°		
	1 Modificador de flujo a 120°		
2 Entradas de aire	2 Toberas	2 x 2.45	
	2 Modificadores de flujo a 60°		
2 Entradas de aire	2 Modificadores de flujo a 120°		
	1 Tobera	4.9	

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Experimentación de los Arreglos con Toberas

4.1.1 Tiempos de Mezclado de los arreglos con toberas

Se analizaron 5 flujos de aire para obtener los tiempos de mezclado de la olla para 3 arreglos de las toberas. La Figura 19 muestra un ejemplo de las curvas Tiempo – Concentración obtenidas para el caso de 4 l/min con una tobera colocada a 0.75R y representa los resultados de los tiempos de mezclado promedios adimensionales. La curva superior muestra los cambios en la concentración para el sensor colocado en la superficie libre, mientras que la curva inferior muestra los cambios en las zonas de baja velocidad detectadas en las pruebas de colorimetría.

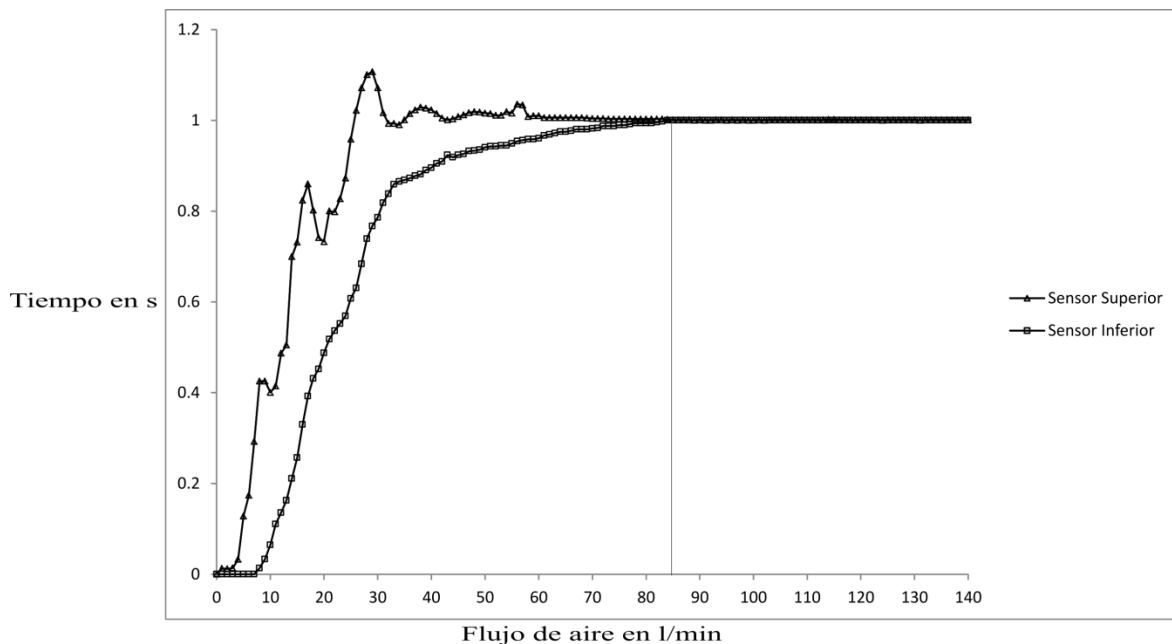


Figura 19. Curva Tiempo – Concentración para el caso con 1 tobera colocada a 0.75R y un flujo de 4 l/min.

En los primeros instantes de la curva cuando el trazador comienza a entrar en la olla, se pueden observar valores de 0 en el tiempo de mezclado para todos los casos, en especial en el sensor colocado en las zonas de baja velocidad. La razón por la cual el tiempo de

mezclado permanece sin cambios durante un pequeño intervalo de tiempo es debido a que se requiere de este tiempo para que el trazador alcance las posiciones donde se encuentran colocados los sensores de medición.

Otro aspecto a tomar en cuenta son las diferencias en el comportamiento que se presentan entre las 2 curvas obtenidas por los sensores de medición. Estas diferencias típicas en el comportamiento del trazador en el sensor superior se deben a que cuando el trazador entra a la olla, el patrón de flujo que se forma dentro de esta tiende a arrastrarlo y llevarlo con el jet, la cual debido a las altas velocidades que presenta tiende a llevar grandes concentraciones del trazador de manera inmediata a la zona donde se encuentra el sensor superior en la olla. Por otro lado, este trazador tiende a tardar más tiempo en llegar a la posición donde se encuentra el sensor en la zona de bajas velocidades debido a las recirculaciones que se forman al interior de la olla. También hay que destacar que los tiempos en los cuales ocurren los máximos en la curva superior (debido a que en ciertos instantes llegan grandes cantidades de trazador las cuales no son constantes en el tiempo, tal y como si ocurre en el sensor del fondo) varían de un caso a otro incluso cuando las condiciones de los experimentos son las mismas, lo que refleja la naturaleza cambiante de este tipo de experimentos. Estos máximos que se registran en las curvas superiores son causados por las fluctuaciones en el movimiento del jet, ya que estas son las responsables del flujo circulatorio en la olla. Por lo que, debido al comportamiento del tiempo de mezclado se puede establecer que las condiciones del flujo en las posiciones de los sensores de medición también se encuentran variando constantemente. Estas fluctuaciones en el flujo dependen del flujo de aire a la entrada, ya que durante los experimentos se observó que el jet está cambiando constantemente de izquierda a derecha; sin embargo, la tendencia en el comportamiento de las gráficas, sin tomar en cuenta las posiciones de las fluctuaciones, es muy similar en la mayoría de los casos.

Por último, hay que establecer que el valor donde ambas curvas se juntan es el tiempo de mezclado final para cada caso. Esto significa que la diferencia entre las concentraciones entre los sensores superior e inferior está por debajo del 5%.

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de los tiempos de mezclado obtenidos para todos los flujos y arreglos estudiados.

Tabla 4. Tiempos de mezclado obtenidos para todos los arreglos estudiados.

Flujo en l/min	Tiempo en s – 1 tobera a 0.75R	Tiempo en s – 1 tobera a 0.66R	Tiempo en s – 2 toberas a 0.66R
2	89	100	103
3	87	98	99
4	84	90	94
4.9	91	88	92
6	99	85	89

Adicionalmente, la Figura 20 muestra las tendencias que siguen los tiempos de mezclado respecto al flujo de aire inyectado para los 3 arreglos de las toberas. Estos resultados demuestran que una disminución o un aumento en el flujo de aire repercuten directamente en la eficiencia del proceso.

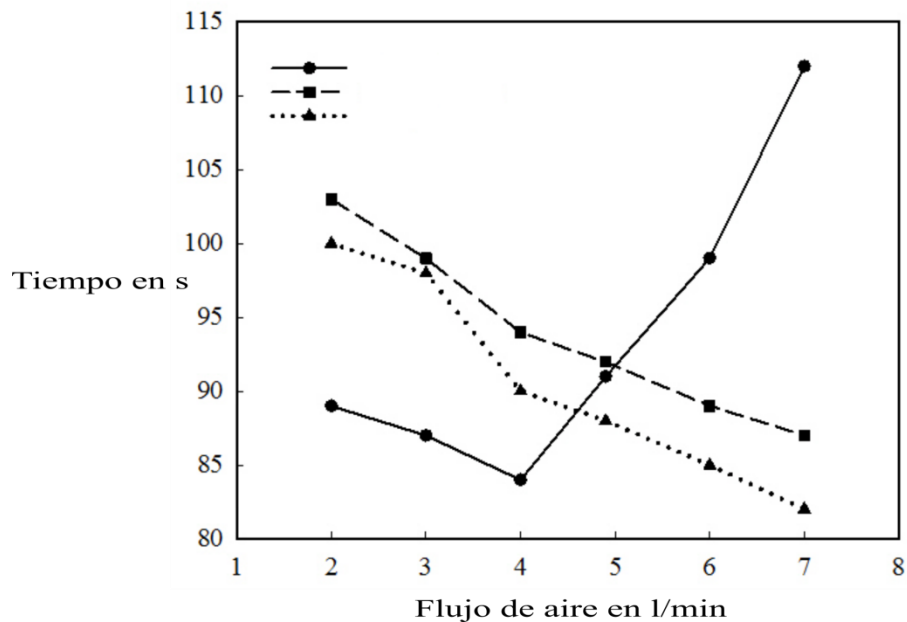


Figura 20. Tendencia del tiempo de mezclado para los 3 arreglos de las toberas.

Para el primer arreglo donde la tobera está colocada a $0.75R$, un flujo de 4 l/min proporcionó el mejor resultado del tiempo de mezclado con 84 segundos. En la Figura 20 se aprecia que la tendencia del tiempo de mezclado para este arreglo, cambia después de este flujo, comenzando a subir para el resto de los flujos estudiados. Tomando en cuenta estos resultados, se puede observar una tendencia negativa cuando se incrementa el flujo de aire por encima del valor escalado cuando se usa una tobera colocada a $0.75R$. Los flujos altos tiene un efecto negativo sobre el tiempo de mezclado, ya que en lugar de disminuirlo lo aumentan, por lo que estos resultados indicarían que aumentar el flujo de aire es nocivo para este arreglo de la tobera. Esto se puede notar debido a que con un flujo de 6 l/min el tiempo de mezclado aumenta hasta un 17.85% (o 15 segundos) respecto al mejor flujo.

En contraste, cuando la tobera se acerca al centro de la olla, la tendencia es positiva para todos los flujos, ya que siempre que este se incrementó, el tiempo de mezclado disminuyó, obteniéndose el mejor resultado a un flujo de 7 l/min con 82 segundos. Por otro lado, para el arreglo con 2 toberas el mejor tiempo de mezclado se presentó cuando se usó el flujo de 7 l/min con 87 segundos y se puede observar, al igual que con el arreglo de 1 tobera colocada a $0.66R$, una tendencia positiva al incrementar el flujo de aire, ya que al aumentar el flujo de aire el tiempo de mezclado disminuye.

Para analizar el efecto de la posición de la tobera sobre los tiempos de mezclado esta se movió de la posición radial de $0.75R$ hacia el centro de la olla, a la posición de $0.66R$. Para evaluar este efecto es necesario dividir los resultados obtenidos en 2 partes: los resultados de los flujos bajos ($2, 3$ y 4 l/min) y los resultados de los flujos altos ($4.9, 6$ y 7 l/min). De acuerdo a los resultados obtenidos, la posición de la tobera más cerca de la pared ($0.75R$) favoreció la disminución de los tiempos de mezclado en los flujos bajos en comparación a cuando la tobera se acerca al centro ($0.66R$). Por otro lado, al acercar la tobera al centro de la olla ($0.66R$), lo posición de la tobera favoreció la disminución en los tiempos de mezclado en los flujos altos, mientras que lo opuesto sucede cuando la tobera se acerca a la pared ($0.75R$). Tomando en cuenta los tiempos obtenidos, la tobera colocada a $0.75R$ presenta mejores resultados sin tener que aumentar el flujo de aire; sin embargo habría que

tomar en cuenta también los efectos del desgaste de la pared y la apertura de la capa de escoria.

Finalmente, con el fin de observar el efecto que tiene el número de toberas a una misma posición radial sobre el tiempo de mezclado, se compararon los resultados obtenidos con 1 y 2 toberas colocadas a $0.66R$. Los resultados obtenidos para esta posición radial son muy similares cuando se tiene 1 y 2 toberas; sin embargo, en todos los casos con 1 tobera se obtuvieron tiempos ligeramente más bajos para todos los flujos. De estos resultados se observa que aunque la tendencia del tiempo de mezclado es la misma con 1 o 2 toberas, para efectos del número de toberas, una sola presentaría mejores resultados que cuando se tienen 2.

Con estos resultados es posible asegurar que evaluar los efectos del flujo de aire, el número de toberas y su posición radial es de suma importancia para los procesos de la olla debido a que para cada arreglo de las toberas podría existir un flujo ideal y una distancia radial que pueden optimizar el tiempo de mezclado así como otros procesos.

4.1.2 Resultados de la Experimentación con la Técnica de PIV: Análisis de la Fluido Dinámica de la Olla de los Arreglos con Toberas

Para explicar el porqué de los resultados obtenidos de las pruebas de conductividad con las cuales se obtuvieron los tiempos de mezclado, se realizaron pruebas con la técnica de PIV para caracterizar la fluido dinámica del sistema con el fin de explicar el tiempo de mezclado en base a la dinámica de fluidos.

En la Figura 21 se muestran los resultados obtenidos de los campos de velocidades para todos los flujos utilizados. Estos fueron analizados en un plano que está localizado en el eje de simetría de las toberas de inyección para los casos donde la inyección es por 1 sola tobera (a dos diferentes posiciones de inyección: $0.66R$ y $0.75R$), mientras que en el caso donde son 2 toberas (en una posición a $0.66R$) el plano pasa por la mitad de la distancia que separa las 2 toberas de inyección.

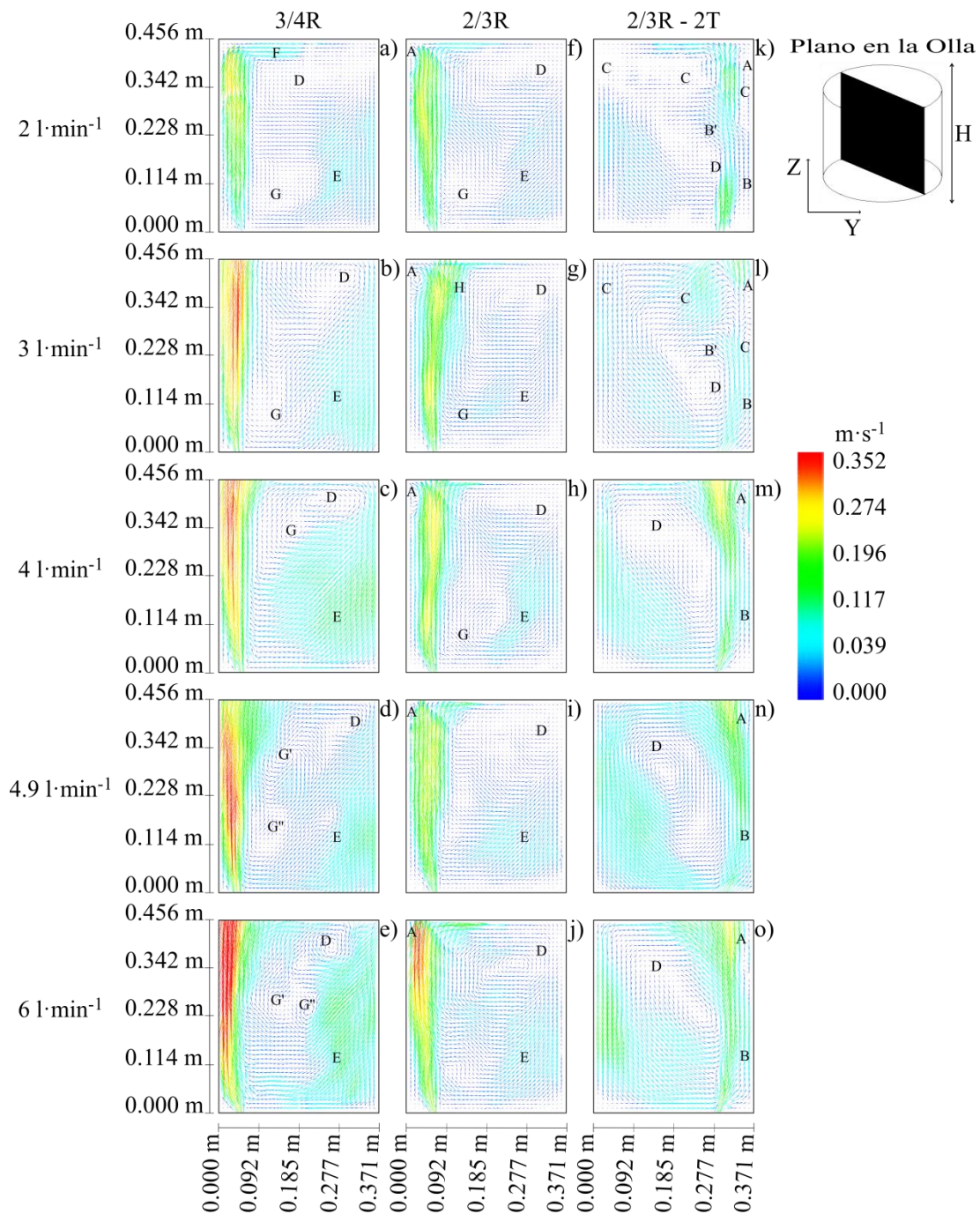


Figura 21. Campos de velocidad en el plano central, perpendicular al fondo de la olla, obtenidos mediante la técnica de PIV para el caso con: 1 tobera colocada a $0.75R$ (a, b, c, d, e), 1 tobera colocada a $0.66R$ (f, g, h, i, j) y 2 toberas colocadas a $0.66R$ (k, l, m, n, o).

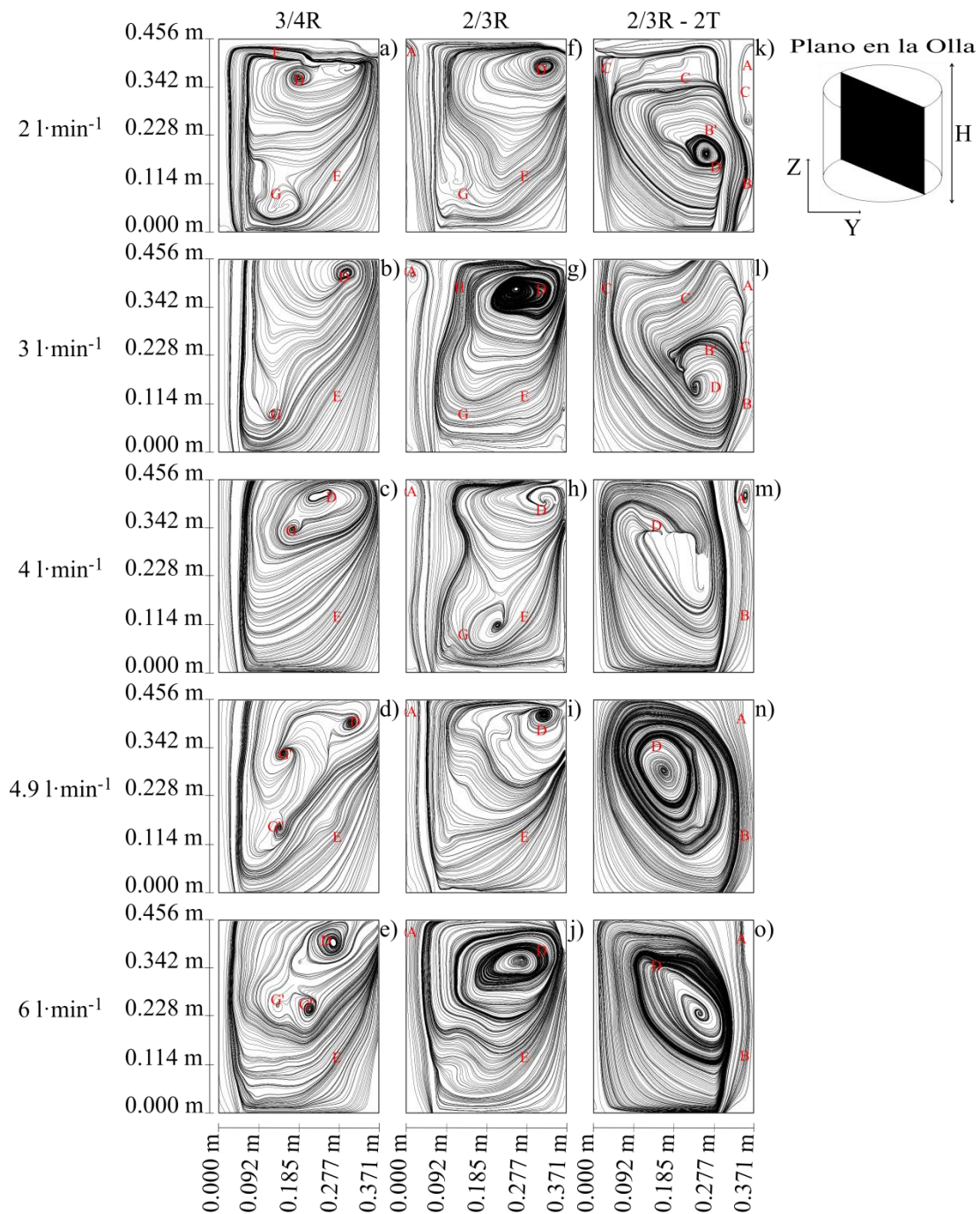


Figura 22. Líneas de corriente en el plano central, perpendicular al fondo de la olla, obtenidas mediante la técnica de PIV para el caso con: 1 tobera colocada a 0.75R (a, b, c, d, e), 1 tobera colocada a 0.66R (f, g, h, i, j) y 2 toberas colocadas a 0.66R (k, l, m, n, o).

Al comparar los casos con 1 y 2 toberas en la posición de 0.66R, se observa que en ambos casos se forma una vorticidad (indicada con la letra A) cercana a la pared y a la superficie del fluido, siendo de mayor tamaño para el caso de 2 toberas. Al incrementar el flujo de 2

l/min hasta 6 l/min, esta vorticidad disminuye su tamaño hasta que casi es imperceptible en los flujos de 4.9 l/min y 6 l/min para ambos casos. Sin embargo, esta vorticidad es de mayor tamaño para los casos de 2 toberas y conforme se incrementa el flujo, los cambios en tamaño y posición son mayores que para el caso de 1 sola tobera (ver Figura 21 k – l). Esto se puede explicar debido a que el flujo se divide entre las 2 toberas, lo que provoca que las fuerzas inerciales sean más pequeñas en la trayectoria inicial del jet en comparación con la inyección de 1 sola tobera. Y debido a esto, las fuerzas de flotación afectan en mayor porcentaje el comportamiento del jet, provocando una mayor oscilación en esta. Esto se observa con mayor efecto en los flujos bajos.

En las Figuras 21k) y 22k) se muestran los campos de velocidades y las líneas de corriente para un flujo de 2 l/min cuando se tienen 2 toberas colocadas a $0.66R$. De estas imágenes se observa que el jet sigue una trayectoria curva hacia la pared de la olla, impactándose con la pared casi a la mitad de la altura de la olla (ver punto B en ambas imágenes). Esto provoca que una parte de la pluma se re direcciona hacia el centro de la olla (ver punto B'), lo que favorece la formación de una vorticidad principal (marcada con el punto D). Esta vorticidad no alcanza a abarcar todo el plano, dejando zonas de baja velocidad (marcadas con el punto C), siendo una de estas zonas el lugar donde se forma la vorticidad A.

Contrario a este comportamiento, en el caso donde se tiene 1 tobera colocada a $0.66R$, en la trayectoria inicial de la pluma, las fuerzas inerciales dominan el comportamiento de esta, la cual mantiene una trayectoria ascendente sobre el eje de inyección, con unas pequeñas oscilaciones pero sin entrar en contacto con la pared de la olla. Al impactarse el jet con la superficie del fluido, existe una tendencia de formarse recirculaciones en ambos lados del jet, formándose la vorticidad A cerca de la superficie entre el espacio de la tobera de inyección y la pared de la olla. Al comparar esta vorticidad con el caso de 2 toberas, se observa que es mucho más pequeña para este caso a un mismo flujo (ver Figura 21f). Del otro lado del jet se forma la vorticidad que cubre casi todo el plano y su ojo se encuentra localizado en la esquina superior de la pared de la olla opuesta a la tobera de inyección (punto D en la Figura 22f.) Esto evita la aparición de zonas de baja velocidad, lo que ayuda

a que este caso tenga un mejor tiempo de mezclado que el de 2 toberas para este mismo flujo.

Al incrementar el flujo a 3 l/min para el caso de 2 toberas, la dinámica del fluido se mantiene muy similar a como se presentó en el flujo de 2 l/min; se mantiene la vorticidad A y la vorticidad principal D, el jet mantiene su impacto con la pared de la olla (en el punto B), así como la desviación de una parte del jet hacia el centro de la olla. Sin embargo las magnitudes de las velocidades con la que se impacta el jet en la pared de la olla se incrementan lo que hace que la vorticidad principal D abarque un área mayor del plano. Esto permite que las zonas de baja velocidad que se presentaron con el flujo de 2 l/min incrementen su magnitud y que la vorticidad A disminuya su tamaño respecto al flujo de 2 l/min. También se observa que el ojo de la vorticidad principal D se desplaza ligeramente hacia abajo y hacia el centro de la olla. Este cambio en la dinámica del fluido cuando se incrementa el flujo a 3 l/min se refleja en una mejora del tiempo de mezclado. Para los flujos de 4 l/min, 4.9 l/min y 6 l/min se observa que al aumentar el flujo, las fuerzas inerciales en la dirección ascendente evitan que el jet se impacte con la pared; sin embargo mantiene una trayectoria curva pegada a la pared de la olla. Esto favorece a que conforme se aumente el flujo, la vorticidad A tienda a seguir disminuyendo su tamaño, de tal manera que a los flujos de 4.9 l/min y 6 l/min es casi imperceptible. Además, la vorticidad principal D se establece como el patrón de flujo principal en el plano, lo que explica que al incrementar el flujo el tiempo de mezclado disminuya, ya que al incrementar el flujo la dinámica del fluido que se va estableciéndose en la olla, es una sola vorticidad. Esto concuerda con lo reportado [1, 22] donde se concluye que un patrón de movimiento del fluido donde se presenta una sola recirculación favorece a tener un mejor mezclado.

Cuando se incrementa el flujo para el caso con 1 sola tobera, se observa que la dinámica del fluido es semejante a como se presentó para el flujo de 2 l/min, salvo algunos pequeños cambios: la vorticidad A tiende a ir desapareciendo al incrementar el flujo, de tal manera que para el flujo de 4.9 l/min casi es imperceptible. Asociado con la disminución de la vorticidad A, se tiene también un ligero desplazamiento del jet hacia la pared de la olla, de tal forma que para el flujo de 6 l/min el jet a partir de la mitad de la altura de la olla se

encuentra muy pegada a la pared (ver Figura 21j). Este desplazamiento del jet sería el origen de la disminución de la vorticidad A al incrementar el flujo. En estos casos predomina el patrón de la dinámica del fluido de una sola vorticidad a lo largo del plano, a excepción del flujo de 4 l/min, donde, en la figura de líneas de corriente se pueden visualizar claramente el vórtice principal marcado con la letra D y un vórtice más pequeño cercano al fondo de la olla (ver Figura 21h). El ojo del vortice principal D para los flujos 2 l/min, 4 l/min y 4.9 l/min mantiene la misma posición; sin embargo para los flujos de 3l/min y 6 l/min se tiene un desplazamiento ligero hacia el centro de la olla, así como un incremento en el tamaño del ojo. Este desplazamiento es originado por el incremento de la energía cinética con la que fluido llega a la pared opuesta y se impacta en ella, lo cual es obvio para el flujo de 6 l/min, ya que es el flujo mayor. Pero para el flujo de 3 l/min la vorticidad A empuja la parte del jet que está a su altura hacia la pared opuesta de la inyección, lo que provoca que la componente y de las velocidades se incremente (ver punto H en la Figura 22g) y como consecuencia se aumente la energía cinética del fluido que se dirige hacia la pared opuesta. El mantener una dinámica del fluido muy semejante para todos los flujos, permite que al incrementar el flujo y al no existir un cambio significativo en el patrón de la dinámica del fluido en la olla, se va a reflejar en un aumento de la energía cinética en el patrón de flujo y como consecuencia a mayor flujo menor tiempo de mezclado.

Como conclusión, se puede decir que para la posición de inyección de $0.66R$ se obtienen mejores tiempos de mezclado cuando se tiene la inyección por 1 sola tobera en lugar de 2. Esto es debido a que el patrón de la dinámica del fluido permite un mejor mezclado según lo reportado [1, 22], el cual está presente desde el flujo más pequeño hasta el más grande. Por otro lado, en el caso de 2 toberas esto únicamente se establece para los dos flujos más elevados (4.9 l/min y 6 l/min), y con la diferencia que el centro de los vórtices están localizados en la zona del centro del plano de la olla y más cercano al fondo. En el caso con 1 sola tobera, el centro de la vorticidad se localiza cerca de la esquina superior opuesta a la inyección, lo que propicia que esta abarque de mejor manera el plano. Además, la

vorticidad A es mucho más pequeña para el caso de 1 sola tobera y su efecto en la pluma es casi nulo, contrario a lo que sucede para el caso de dos toberas.

Si ahora desplazamos la tobera más cerca de la pared a una posición de $0.75R$, se puede observar que en ningún flujo se presenta la vorticidad A, la cual está presente para los dos casos a la posición de $0.66R$. Además, la transferencia de cantidad de movimiento del gas al líquido en el jet es más eficiente, ya que para todos los flujos, en la pluma las velocidades son de mayor magnitud que para los casos de la posición de $0.66R$, lo que favorece que existan zonas con mayor energía cinética que ayudan a mejorar los tiempos de mezclado (ver Figura 21 a – e). Esto se puede visualizar si se comparan los campos de velocidades con inyección a través de 1 sola tobera para las posiciones de $0.75R$ y $0.66R$. Se observa que en la zona marcada con E en ambos campos de velocidades, todos los casos a $0.75R$ tienen zonas más amplias con magnitudes de velocidad más altas. Todo lo anterior explica porque para los flujos de 2 l/min, 3 l/min y 4 l/min la inyección a través de 1 sola tobera en una posición de $0.75R$ tiene los mejores tiempos de mezclado, como se observa en la Figura 20 y en la Tabla 4. Además, el tiempo de mezclado es inversamente proporcional al flujo de inyección, ya que este comportamiento cambia para el flujo de 4.9 l/min donde el tiempo de mezclado en lugar de seguir disminuyendo se incrementa, manteniendo este mismo comportamiento en el flujo de 6 l/min.

Pero esto no ayuda a entender porque para los flujos altos a $0.75R$ (4.9 l/min y 6 l/min) el tiempo de mezclado aumenta. En estos casos, el jet tiende a pegarse más hacia la pared, lo que provoca que esta se desvíe y oscile, cargándose hacia la pared opuesta. Esto se refleja en un aumento de la energía cinética del sistema y por tanto de las vorticidades que se forman al interior de la olla. En las Figuras 21d) y 21e) se puede observar que la zona marcada con E aumenta su velocidad, presentando una mayor turbulencia, lo que se refleja en el incremento del tiempo de mezclado. Por lo tanto, una mayor turbulencia causa una mayor disipación de energía, pero no necesariamente significa un mejor tiempo de mezclado, debido a las vorticidades que se forman y que son las responsables de atrapar el trazador.

De acuerdo a la Tabla 4, el tener un solo tapón cerca de la pared de la olla proporciona los mejores tiempos de mezclado.

4.2 Experimentación de los Arreglos con Modificadores de Flujo

Las Figuras 23 y 24 muestran los contornos y los campos de velocidad en un plano transversal a la mitad de la altura de la olla para los casos con 1 tobera y para cada uno de los tapones con los canales a diferentes ángulos de torsión.

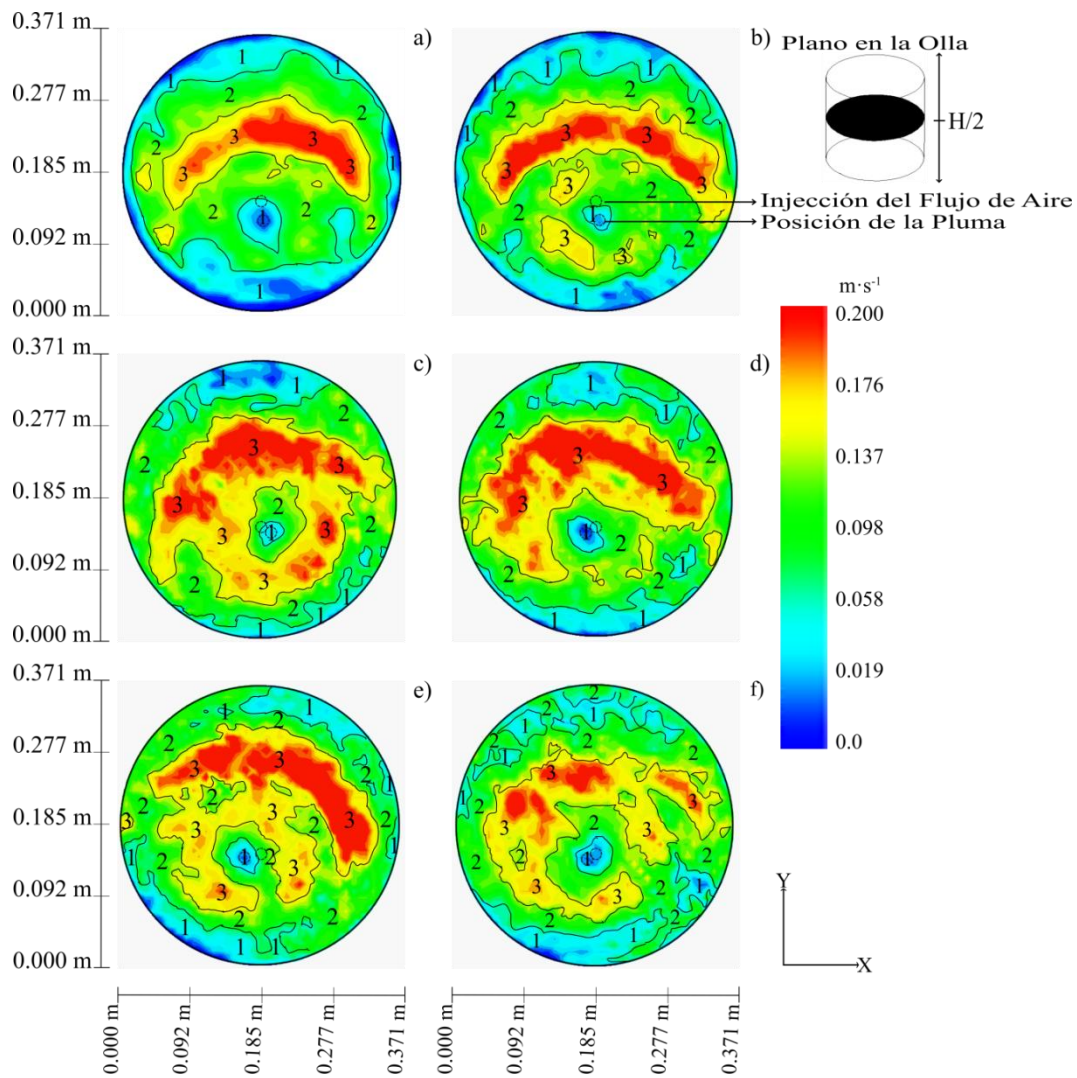


Figura 23. Contornos de velocidad obtenidos usando la técnica de PIV en un plano transversal a la mitad de la altura de la olla para todos los casos: a) tobera, b) modificador a 30° , c) modificador a 60° , d) modificador a 90° , e) modificador a 120° y f) modificador a 180° .

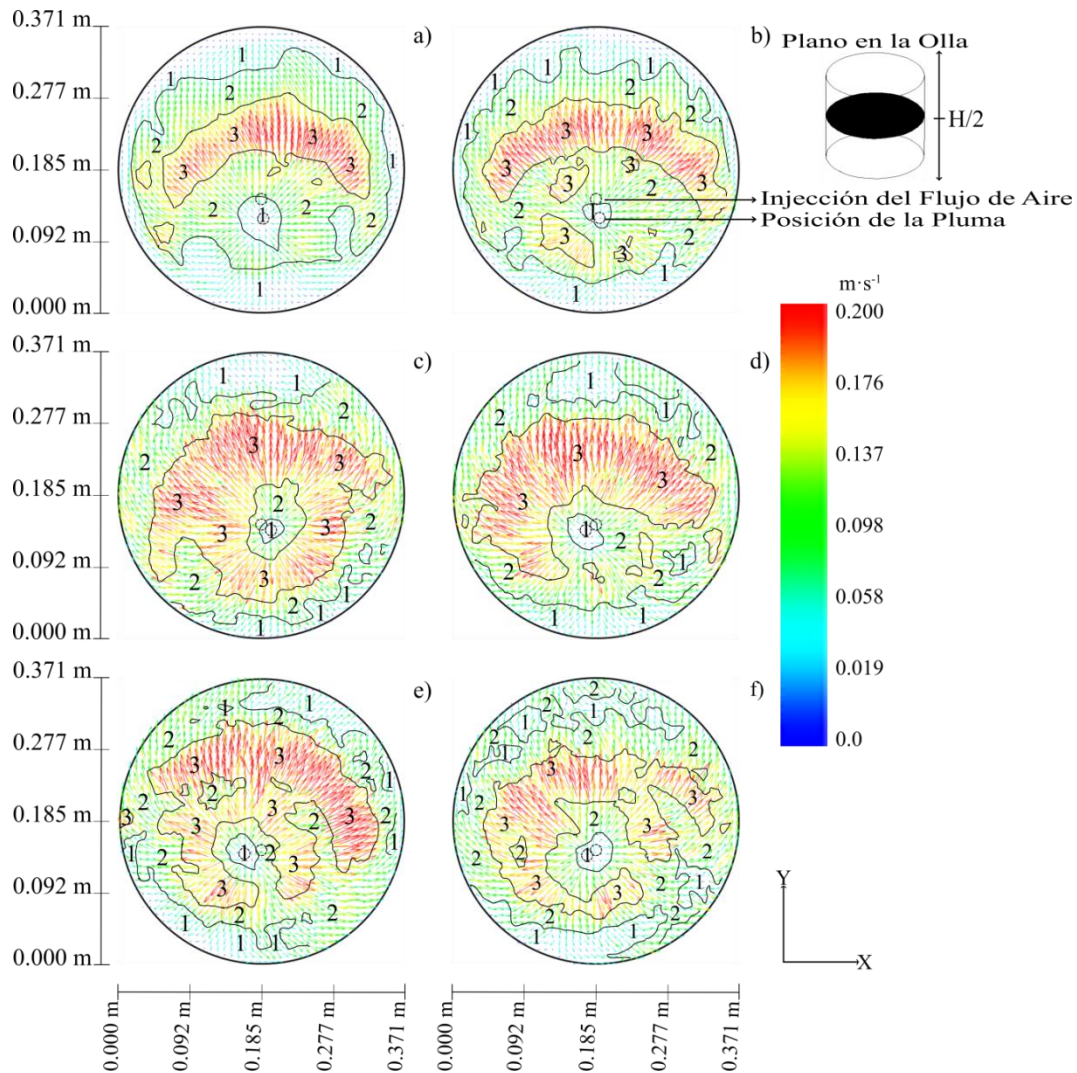


Figura 24. Vectores de velocidad obtenidos usando la técnica de PIV en un plano transversal a la mitad de la altura de la olla para todos los casos: a) tobera, b) modificador a 30° , c) modificador a 60° , d) modificador a 90° , e) modificador a 120° y f) modificador a 180° .

Las zonas de baja velocidad (de acuerdo a la escala de colores y marcadas con el número 1) o donde la magnitud de la velocidad se concentra en el eje z , están localizadas cerca de las paredes de la olla y en la ubicación del jet para todos los casos. Sin embargo, estas zonas presentan una mayor extensión para el caso con tobera, tanto en los contornos como en los campos de velocidad (ver Figuras 23a y 23a) y tienden a disminuir a medida que el ángulo de torsión de los canales del tapón se incrementa (ver Figuras 23 y 24). Esto corrobora que la torsión de los canales ayuda a que la magnitud de la velocidad sea distribuida en los tres ejes y no se concentre solamente en el eje z .

En los contornos de velocidad para el caso de la tobera, se observa un área donde las magnitudes de velocidad son las más altas (marcadas con el número 3 en la Figura 23a). Esta zona está ubicada en la parte superior de la zona por donde tiene lugar la inyección; a medida que el ángulo de torsión aumenta, se presenta una mejor distribución a lo largo de los 360°, y su área aumenta (ver Figuras 23b – f y 24b – f). Sin embargo, es en el caso con un ángulo de 60° (ver Figuras 23c y 24c), donde esta área está distribuida más uniformemente a lo largo de los 360°, seguido del caso con el ángulo de 120° (ver Figuras 23e y 24e). Esto favorece a las zonas de baja velocidad (o donde la magnitud de la velocidad se localiza en el eje z), las cuales tienden a disminuir con el uso de los tapones con los canales con ángulos de torsión, lo que podría favorecer para tener una mejor agitación y disminuir los tiempos de mezclado.

Además, en las Figuras 23a y 24a (caso con tobera), también se observa que hay una cierta separación entre la ubicación de la inyección que está en la parte inferior de la olla y la ubicación del jet en el plano. Esto sería causado por una curvatura de la pluma, la cual tiende a disminuir a medida que el ángulo de torsión aumenta, y permite la formación de un jet más vertical (ver Figuras 23 y 24), siendo los casos con ángulos de 60°, 90° y 180° los que mejor representan este comportamiento.

Para determinar cuantitativamente el efecto de los modificadores, se obtuvo el promedio espacial en la dirección x : la media de la resultante de la velocidad $\overline{V_R}$, la media de la componente $\overline{V_y}$ y la media de la componente $\overline{V_x}$ (filas de los campos de velocidad en la Figura 24). La Figura 25 muestra estas cantidades para el caso donde se tiene la tobera (Figura 24a) a lo largo del diámetro de la olla (donde $y = 0$ m y $y = 0,371$ m representan los lados opuestos del diámetro de la olla).

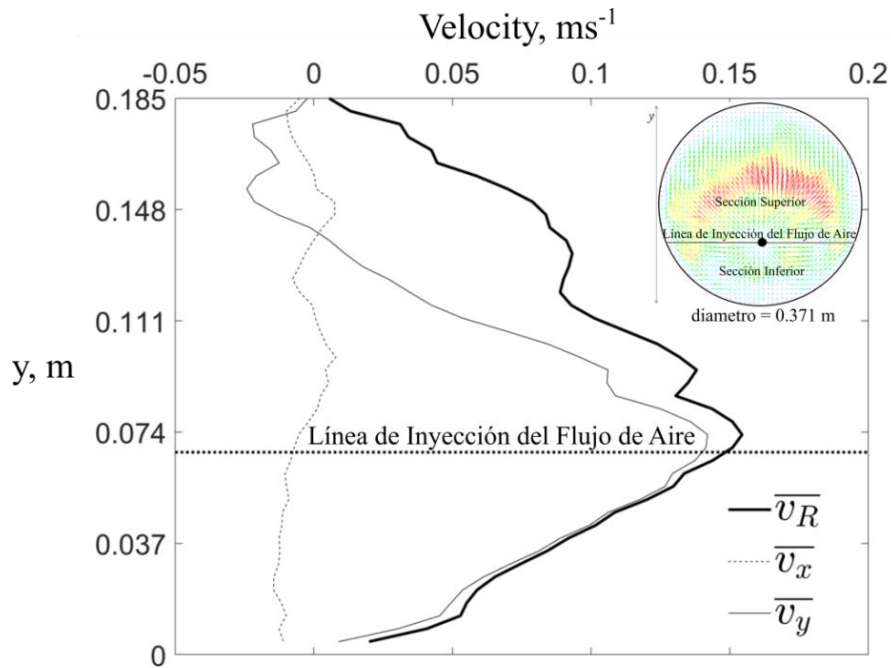


Figura 25. Valores de \overline{V}_x , \overline{V}_y , y \overline{V}_R para el caso con tobera a lo largo del diámetro de la olla.

Las velocidades en $y = 0,135$ m corresponden a la línea de inyección del flujo de aire y para los casos de \overline{V}_R y \overline{V}_y , sus magnitudes más altas se ubican alrededor de esta línea. Por otro lado, con respecto a \overline{V}_x , sus valores fluctúan alrededor de cero. De esto, se observa una clara anisotropía entre los valores de \overline{V}_x y \overline{V}_y , siendo \overline{V}_y la que más contribuye a la velocidad resultante. El efecto de la pared debajo de la inyección impide el desarrollo de velocidades más altas. El análisis se llevó a cabo para todos los casos que se muestran en la Figura 24.

Para determinar la ventaja de usar los modificadores de flujo sobre la tobera, con respecto al incremento en las velocidades, se calculó el valor de $\eta = \overline{V}_{R_{\text{modificador}}} / \overline{V}_{R_{\text{tobera}}}$. Este se define como la relación entre las velocidades resultantes del caso con el modificador de flujo ($\overline{V}_{R_{\text{modificador}}}$) y en el caso con la tobera ($\overline{V}_{R_{\text{tobera}}}$). La figura 26 muestra el valor de η para todos los casos estudiados a lo largo del diámetro de la olla.

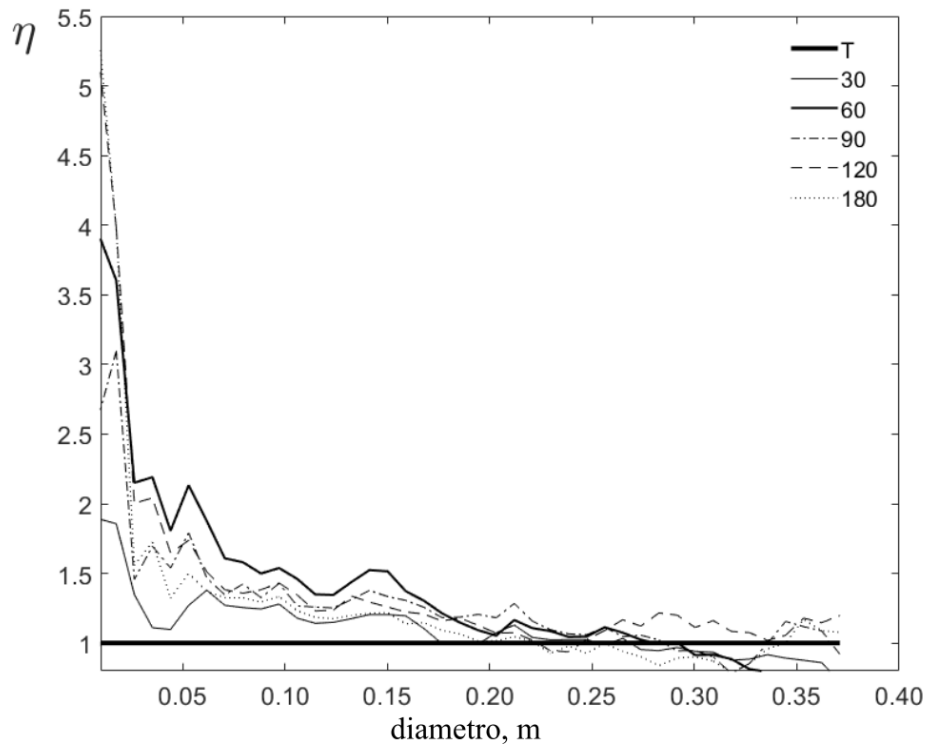


Figura 26. Relación de las velocidades de los casos con modificadores de flujo con respecto al caso con tobera (T).

El valor de $\eta = 1$ corresponde al caso de $\eta = \overline{V}_{R_{\text{tobera}}} / \overline{V}_{R_{\text{tobera}}}$. El área por encima de esta línea y por debajo de la curva corresponde al beneficio, es decir, el incremento en la velocidad resultante para cada caso estudiado. Esta área se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Beneficio en el área bajo la curva obtenidos para cada ángulo del modificador.

Ángulo del modificador	Área bajo la curva
30°	2.13
60°	13.88
90°	11.13
120°	14.63
180°	9.63

A partir de estos valores, se seleccionaron los modificadores con ángulos de torsión de 60° y 120° para estudiar el tiempo de mezclado y la agitación del sistema, debido a que estos tienen el mayor efecto al aumentar las velocidades resultantes en este plano.

4.2.1 Tiempos de Mezclado de los Arreglos con Modificadores de Flujo

En la Figura 27 se muestran las gráficas tiempo – concentración de los dos sensores para los casos analizados a 0.75R. Ambas curvas representan el promedio adimensional de los datos obtenidos de cinco experimentos realizados en cada sensor respectivamente.

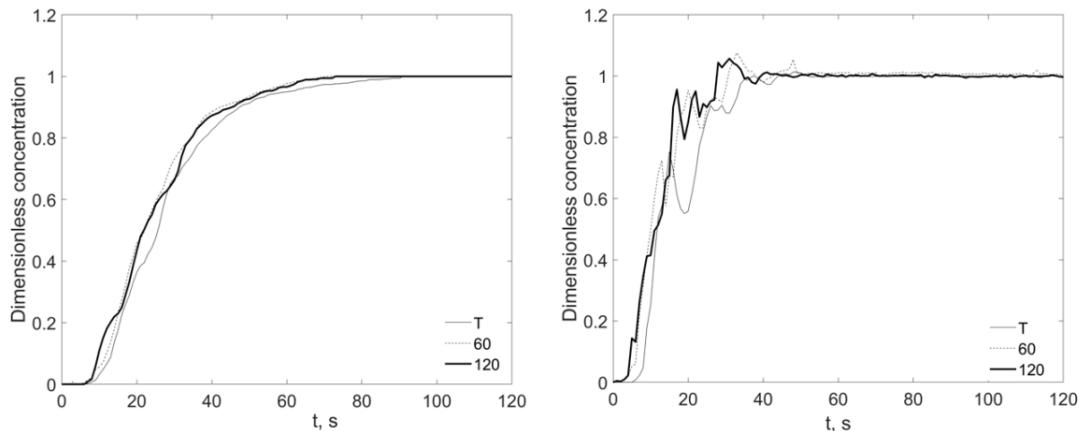


Figura 27. Gráficas tiempo – concentración obtenidas para todos los casos estudiados: a) sensor inferior y b) sensor superior.

En las gráficas se observa que en los primeros 40 segundos, las curvas de los modificadores de flujo tienen mayor pendiente con respecto a la curva obtenida donde se utilizó la tobera. Esto indica que existe mayor agitación en estos dos casos, lo cual se verifica en los resultados finales que se presentan en la Tabla 6, donde están los resultados para todos los casos analizados.

La Tabla 6 muestra que para los casos con 1 tobera a 0.75R y 2 toberas a 0.66R, la diferencia es de 1 segundo; sin embargo, para el caso con 1 tobera a 0.75R, el tiempo de mezcla disminuye un 22% cuando se utiliza el modificador con un ángulo de torsión de los canales de 60° y 20% con el ángulo de torsión de 120°. Por otro lado, para el caso con 2 toberas a 0.66R, el tiempo de mezclado disminuye un 11% cuando se utiliza el modificador con un ángulo de torsión de los canales de 60° y 8% con el ángulo de torsión de 120°.

Tabla 6. Tiempos de mezclado obtenidos para todos los casos de estudio.

Tipo de inyección	Tiempo en segundos
1 Tobera a 0.75R	91
1 Modificador a 60° a 0.75R	71
1 Modificador a 120° a 0.75R	73
2 Toberas a 0.66R	92
2 Modificadores a 60° a 0.66R	82
2 Modificadores a 120° a 0.66R	85

Por tanto, se puede concluir que los canales con ángulo de torsión funcionan mejor cuando hay 1 sola inyección y cuando hay un ángulo de torsión de los canales de 60°.

4.2.2 Resultados de la Experimentación con la Técnica de PIV: Análisis de la Fluido Dinámica de la Olla de los Arreglos con Modificadores de Flujo

En la Figura 28 se muestran fotografías del jet obtenidas de la experimentación con el PIV para el caso de 1 inyección.

En estas imágenes se observa que con la inyección con tobera, el jet tiende a curvarse e impactar con la pared de la olla (ver punto 1), provocando que la pluma se deforme en su trayectoria ascendente. Con el uso del modificador con un ángulo de 120°, la trayectoria del jet se mantiene cerca de la pared pero sin tocarla, mientras que en el caso del modificador con el ángulo de 60°, su trayectoria se mantiene sobre el eje de la inyección. Este cambio en la trayectoria del jet con el uso de los modificadores mejora la transferencia de cantidad de movimiento desde el aire hacia el agua, lo cual puede observarse en la Figura 29 en los campos de velocidad.

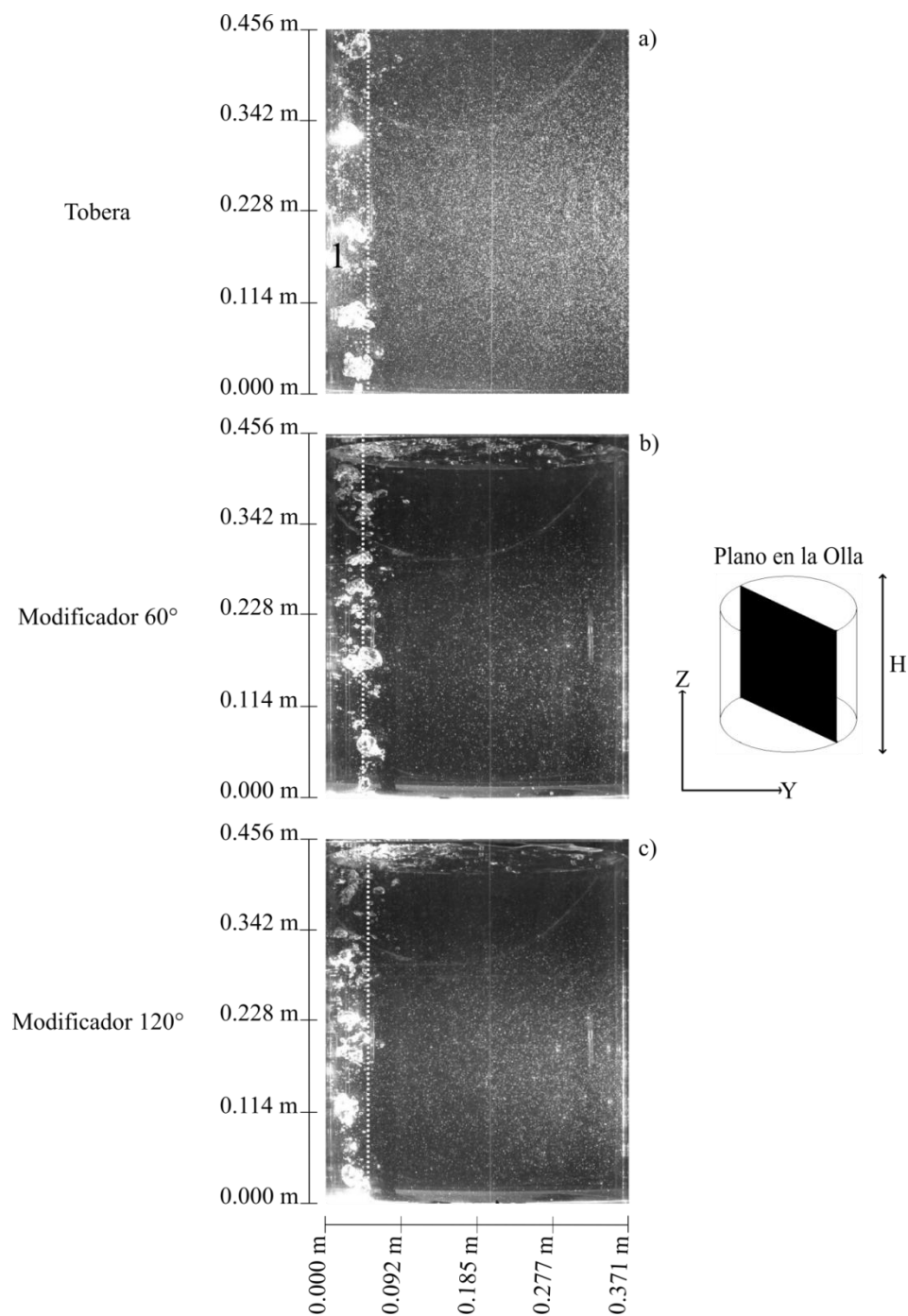


Figura 28. Jet de burbujas en la experimentación para el caso con 1 inyección: a) tobera, b) modificador de flujo a 60° y c) modificador de flujo a 120°.

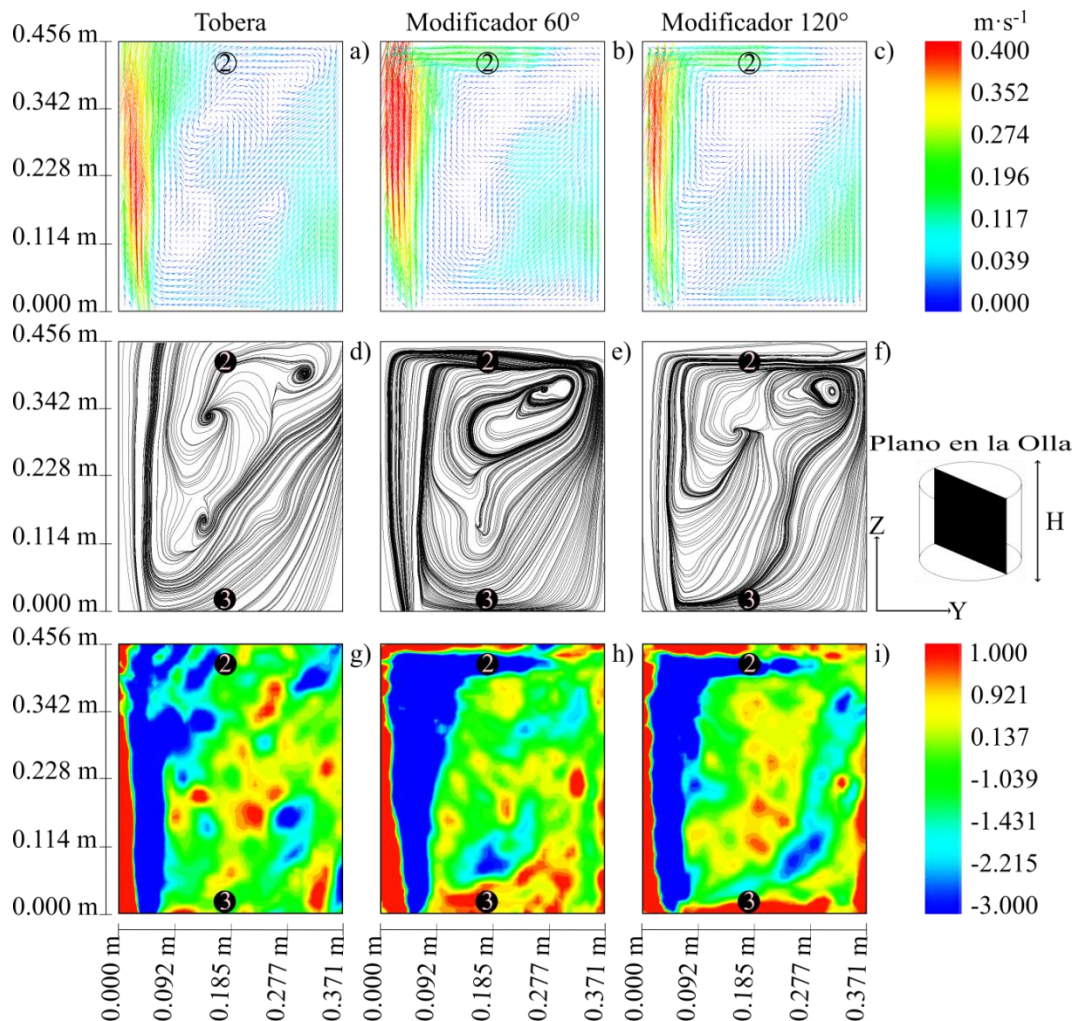


Figura 29. Campos de velocidad, líneas de corriente y contornos de vorticidad en el plano central, perpendicular al fondo de la olla, obtenidos mediante la técnica de PIV para el caso con 1 inyección usando: la tobera (a, d y g), el modificador de flujo a 60° (b, e y h) y el modificador de flujo a 120° (c, f y i).

En esta imagen, las velocidades en el jet tienden a ser mayores en los casos donde se utilizan modificadores, encontrándose las velocidades más altas y un mayor espesor del jet para el caso del modificador con canales de torsión a 60° , mientras que las menores se encuentran en el caso con una tobera.

Los canales con los ángulos de torsión proporcionan una cierta velocidad tangencial al aire que permite que la pluma mantenga una trayectoria más vertical y al mismo tiempo mejoran la transferencia de cantidad de movimiento al fluido en el área cercana a la superficie (marcada con el número 2). Ahí, para los casos con los modificadores, los

vectores de velocidad del fluido se ubican en la dirección y . Esto favorece la recirculación del fluido hacia la pared opuesta de la inyección, tal y como lo confirman los contornos de vorticidad para esa misma zona, donde la rotación hacia la pared opuesta a la pared de la inyección es más fuerte para los casos con los modificadores (ver Figura 29 g – i). Con el uso de la tobera, las magnitudes de la velocidad son menores para esta misma área (punto 2) y la magnitud de la velocidad se divide en las componentes y y z , favoreciendo una orientación más ascendente, tal y como se observa en las líneas de corriente para la misma área. Esto podría dar lugar a una mayor área de apertura de la capa de escoria (ver Figuras 29 a – c).

También se puede observar en los contornos de vorticidad, en la zona de influencia de la pluma (ver Figuras 29 g – i) que el área de los contornos azules aumenta y es más uniforme con el uso de los modificadores, lo que indica que hay una mayor tendencia a rotar el fluido hacia la pared opuesta de la inyección. En el fondo de la olla (en la zona marcada con el número 3), se observa que los contornos de vorticidad rojos predominan en los casos con los modificadores promoviendo la regulación del fluido hacia la pared de la inyección, como se muestra en las líneas de corriente para la misma área.

Para los casos con modificador, todo lo anterior favorece un movimiento de rotación en espiral que abarca todo el plano de la olla, con trayectorias cerradas de las líneas de corriente, estableciéndose de mejor manera para el caso con el modificador de 60° , donde sólo se observa una vorticidad (ver Figura 29e). Este no es el caso con el modificador de 120° , donde se observa una vorticidad principal y una vorticidad menor (ver Figura 29f). En el caso de la tobera, no es posible establecer un movimiento de rotación en espiral con trayectorias cerradas de las líneas de corriente, ya que se forman tres pequeños vórtices distribuidos dentro del plano (ver Figura 29d). Estas vorticidades podrían actuar como sumideros del trazador, además de la colisión de las líneas de corriente de los vórtices en direcciones opuestas; las condiciones antideslizantes establecerían que disminuyen la transferencia de masa y de cantidad de movimiento. En la tabla 4 se puede observar que el caso con mejor tiempo de mezclado es el del modificador con los canales de torsión a 60° , el cual presenta una sola vorticidad que ocupa todo el plano, lo que coincide con lo

reportado en otros trabajos, donde se cree que este tipo de patrón de movimiento ayuda a hacer que la agitación sea más eficiente [1,22].

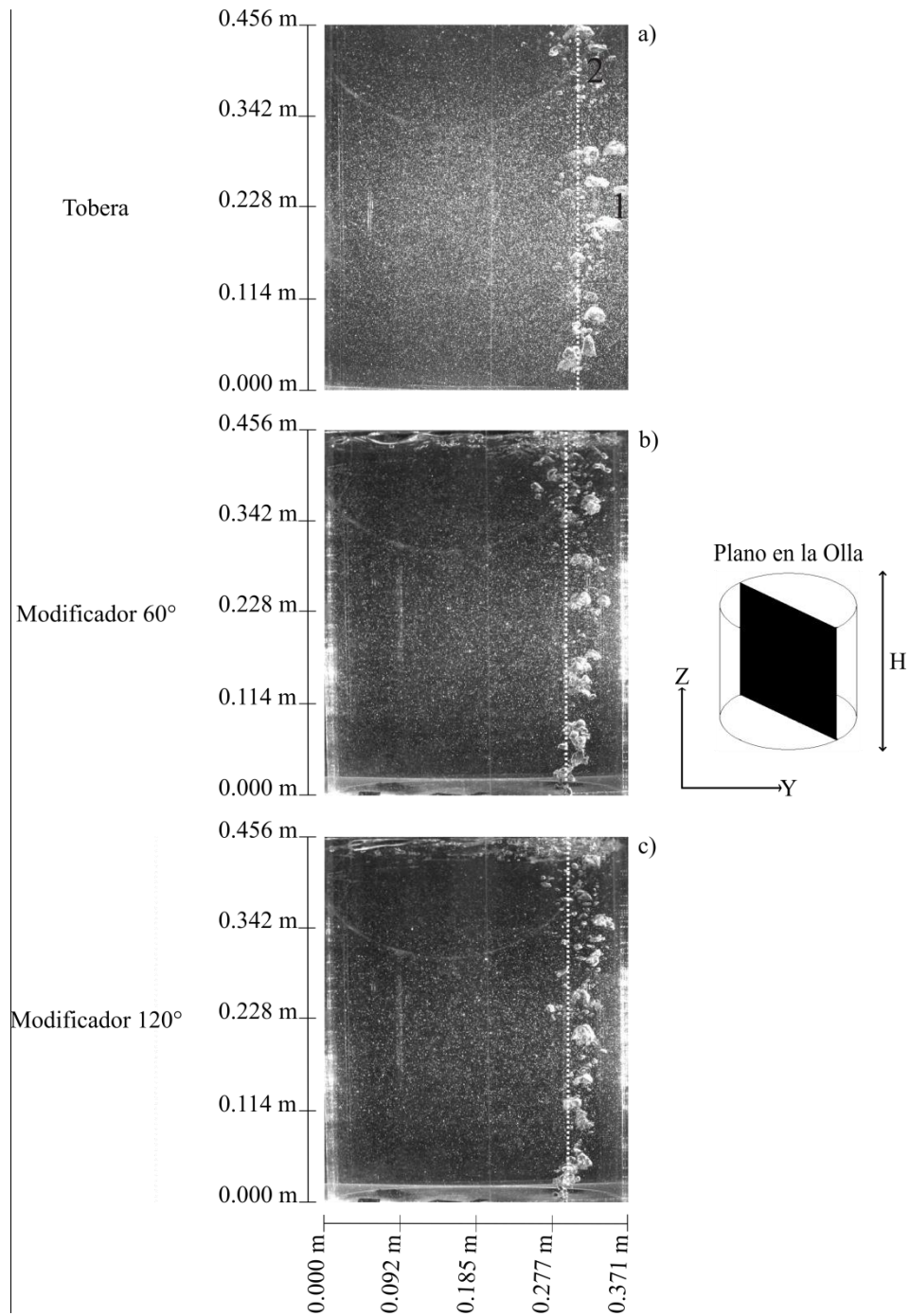


Figura 30. Jet de burbujas en la experimentación para el caso con 2 inyecciones: a) tobera, b) modificador de flujo a 60° y c) modificador de flujo a 120°.

Para el caso de 2 inyecciones, en la Figura 30a) se observa que, el jet tiende a curvarse y golpea la pared de la olla (ver punto 1), provocando que el jet se deforme en su trayectoria, ascendiendo y doblándose hacia el centro, formando una vorticidad cerca de la superficie (ver punto 2).

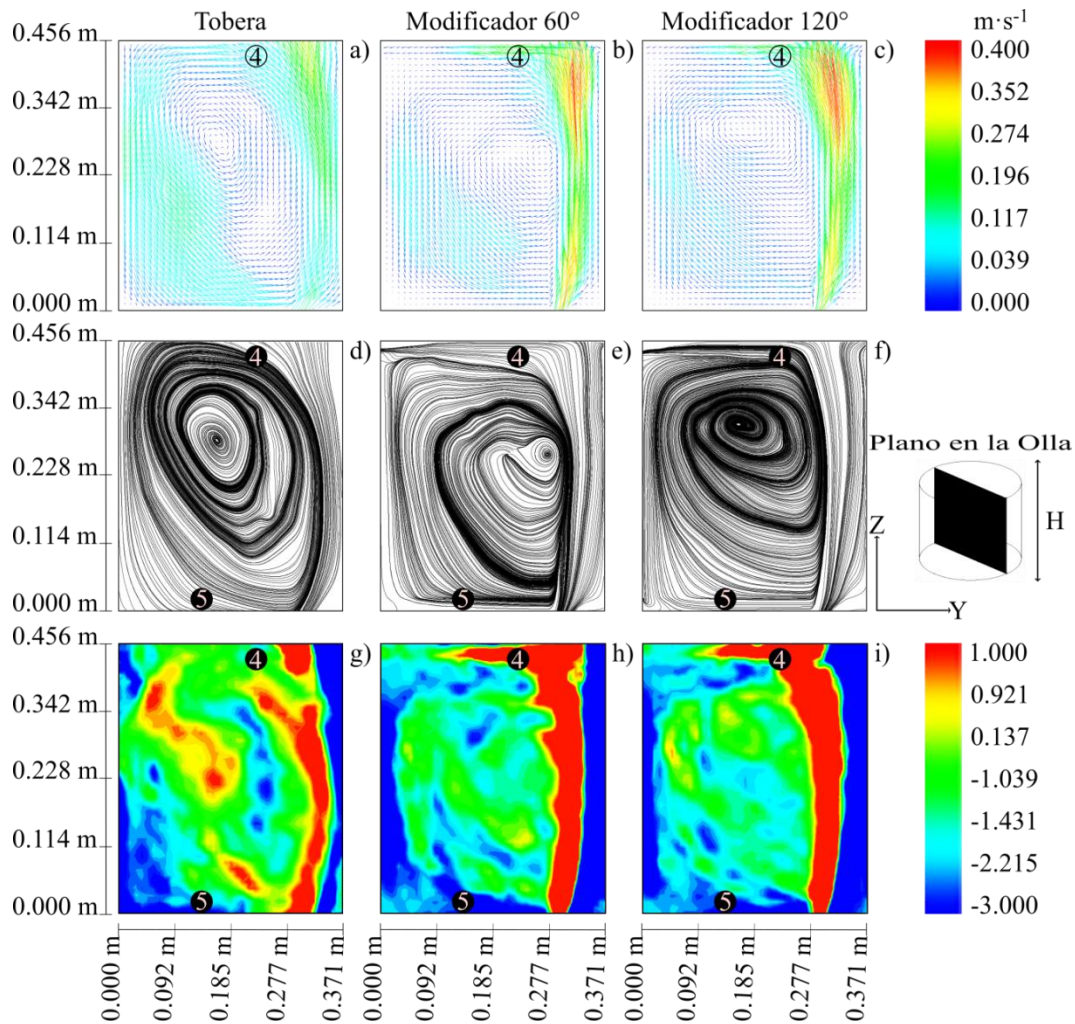


Figura 31. Campos de velocidad, líneas de corriente y contornos de vorticidad en el plano central, perpendicular al fondo de la olla, obtenidos mediante la técnica de PIV para el caso con 2 inyecciones usando: la tobera (a, d y g), el modificador de flujo a 60° (b, e y h) y el modificador de flujo a 120° (c, f y i).

Con el uso de los modificadores, el jet se mantiene cerca de la pared pero sin impactarla. Esto ayuda a que en el área cerca de la superficie (marcada con el número 4 en las Figuras 31b) y 31c), la magnitud de los vectores se concentre en la dirección y , al contrario de lo que pasa cuando se usa la tobera, donde la magnitud de la velocidad se distribuye en las

componentes y y z , favoreciendo una orientación hacia arriba, como se observa en las líneas de corriente para la misma zona. Esto podría causar una mayor apertura de la capa de escoria (ver Figuras 31 d – f).

En el caso de 1 inyección, se puede observar en los contornos de vorticidad, en la zona de influencia del jet (ver Figuras 31 g – i), que el área de los contornos rojos aumenta y es más uniforme con el uso de los modificadores. También, en la zona (marcada con el número 4 para los casos con modificadores), se observa que el contorno rojo tiene mayor extensión, alargando hacia el centro de la olla, lo que indica que hay una mayor tendencia a que el fluido gire hacia la pared opuesta de la inyección. Adicionalmente, en el fondo de la olla (en el área marcada con el número 5), se muestra que los contornos de vorticidad en azul predominan en los casos con los modificadores (ver Figuras 31h y 31i), indicando una recirculación del fluido hacia la pared de la inyección como se muestra en las líneas de corriente para la misma zona en las Figuras 31e) y 31f).

Todo lo anterior favorece que la vorticidad cubra todo el plano y que el transporte de masa se produzca de manera más eficiente en estos casos, como lo muestran los resultados de los tiempos de mezclado en la Tabla 4. Sin embargo, hay pequeñas diferencias en los casos con modificadores, ya que en ambos casos se forma una sola vorticidad como se ve en las Figuras 31e) y 31f). Aunque el ojo del vórtice se presenta en diferentes ubicaciones, para el modificador con los canales de torsión a 120° , el ojo del vórtice se ubica más hacia el centro, lo que favorece una concentración del trazador en esa área, o que el tiempo que tarda el trazador en llegar a ese punto se incremente. En el caso del modificador con canales de torsión a 60° , su ojo se encuentra debajo de la posición del ojo del vórtice en el caso del modificador a 120° y cerca del jet, lo que permite que el trazador que llega a esta zona pueda reincorporarse más rápido al volumen total, mejorando el tiempo de mezclado. Esto se muestra en los resultados de la Tabla 4, donde este caso tiene el mejor tiempo de mezclado para cuando se tienen 2 inyecciones.

En contraste, con el uso de la tobera la vorticidad toma una forma ovalada con una dirección ascendente, estando el ojo del vórtice más cerca de la pared opuesta de la

inyección y más cerca de la superficie que del fondo. Esta ubicación del ojo del vórtice favorece una concentración del trazador en esa zona, o el tiempo que le toma el trazador en llegar a ese punto, reflejándose en mayores tiempos de mezclado como se observa en la Tabla 4.

La diferencia en los tiempos de mezclado entre los ángulos de 60° y 120° tienen que ver con la eficiencia en la transferencia de momento de la pluma al fluido en la zona cercana al fondo de la olla, ya que una mejor transferencia en esta zona favorece un mejor tiempo agitación y en consecuencia, un mejor tiempo de mezclado. En la Figura 24, los campos de velocidad se muestran en un plano transversal a la mitad de la altura de la olla para diferentes ángulos (30° , 60° , 90° , 120° y 180°) y se muestra que para el ángulo de 60° , el área con velocidades de mayor magnitud es mayor con respecto a los ángulos menores y está mejor distribuida a lo largo de los 360° del plano. Con respecto a los demás ángulos, el que más se acerca a esta distribución es el ángulo de 120° , concluyendo que la torsión de los canales favorece que la transferencia de cantidad de movimiento del gas al líquido no se concentre solo hacia arriba y que también está presente en la dirección radial. De estos, el ángulo de 60° el que presenta una mejor transferencia en la dirección radial así como mejor distribución a lo largo de los 360° , seguido del ángulo de 120° .

Conclusiones

En este trabajo de investigación se estudió el efecto del uso de modificadores de flujo con diferentes ángulos de torsión en un modelo acrílico de una olla escalada a 1:7. Esta fue caracterizada mediante las técnicas de conductividad eléctrica y PIV. La inyección del aire se llevó a cabo a través de dos arreglos: 0.75R y 0.66R. Según los resultados obtenidos durante la experimentación mediante el uso de una tobera y modificadores con canales de torsión, se puede concluir lo siguiente:

1. El caso que presentó el menor tiempo de mezclado del arreglo con 1 tobera colocada a 0.75R fue con el flujo de 4 l/min con 84 segundos. Por otro lado, el caso que presentó el menor tiempo de mezclado del arreglo con 1 tobera colocada a 0.66R fue con el flujo 6 l/min con 85 segundos. Finalmente, el caso que presentó el menor tiempo de mezclado del arreglo con 2 toberas colocadas a 0.66R fue el caso con el flujo de 6 l/min, con un tiempo de 89 segundos. Con esto, se concluye que el caso con el arreglo a 0.75R ofrece una mejor alternativa de mezclado en la olla.
2. Acercar la tobera al centro de la olla (0.66R), propicia una disminución del tiempo de mezclado cuando se aumenta el flujo de aire, debido a que esto mejora el patrón de flujo, lo que favorece al transporte del trazador. Por otro lado, cuando la tobera se acerca a la pared de la olla (0.75R), los flujos bajos propician una disminución del tiempo de mezclado, mientras que por el contrario, los flujos altos causan tiempos de mezclado altos. Con esto se concluye que, bajo ciertas condiciones, es favorable tener flujos de aire altos con el fin de aumentar el transporte de masa y energía en la olla; sin embargo, bajo otras condiciones, los efectos que los flujos de aire demasiado altos tienen sobre la fluido dinámica de la olla pueden ser nocivos para el fenómeno del mezclado.
3. El valor obtenido del tiempo de mezclado para cada caso depende principalmente del comportamiento fluido dinámico dentro de la olla. El comportamiento está fuertemente influenciado por el valor del flujo de aire suministrado, el número de toberas, su posición radial, ya que estas variables son las que definen el mezclado.

De estos, en base a los resultados obtenidos, la posición radial es la variable más importante en el proceso, ya que es la que tiene un mayor efecto sobre las condiciones del mezclado. Por esto, es recomendable mantener un patrón de flujo estable con 1 sola recirculación grande que abarque toda la olla, de tal manera que el flujo se distribuya de manera uniforme.

4. El uso de modificadores con canales de torsión con ángulos de 60° y 120° mejoran los tiempos de mezclado para los dos casos de inyección. Para el caso de una sola inyección (0.75R), el tiempo de mezclado disminuye en un 22% cuando el modificador se usa con un ángulo de torsión de los canales de 60° y 20% con un ángulo de torsión de 120° . Para el caso de dos inyecciones (0.66 R), el tiempo de mezclado disminuye en un 11% cuando el modificador se usa con ángulo de torsión de los canales de 60° y 8% con un ángulo de torsión de 120° .
5. Los canales con los ángulos de torsión dan una cierta velocidad tangencial al aire. Esto permite que la pluma mantenga una trayectoria más vertical y que se genere una dinámica de fluidos que promueve un movimiento de rotación en espiral que abarca todo el plano de la olla, con trayectorias de líneas de corriente cerradas. Este patrón de flujo se ve más claramente cuando el modificador está utilizado con el ángulo de torsión a 60° .
6. De los dos ángulos de torsión, el ángulo de 60° fue con el que se obtuvieron mejores tiempos de mezclado, tanto para 1 inyección a 0.75 R como para 2 inyecciones a 0.66 R.
7. Los arreglos con 1 inyección presentaron mejores resultados en comparación con los arreglos con inyección dual. Esto se dio tanto con el uso de toberas como con el de modificadores.

Trabajo Futuro: Generación de un Flujo Rotacional Mediante una Inyección de Aire por el Costado de la Tobera

En el presente trabajo se propuso el uso de modificadores de flujo con el fin de generar un flujo tangencial. Esta por supuesto no es la única forma de lograrlo, por lo que además se propuso inyectar el aire a la tobera de manera lateral en lugar de por el fondo. Esto fue basado en el tubo Ranque Hilsch, el cual es un dispositivo mecánico que separa un flujo de gas en una corriente de baja temperatura y una de alta. Este dispositivo es un cilindro abierto en sus extremos por el cual entra un gas tangencialmente a alta presión a través de una boquilla con un área menor a la del cilindro, pasando a través de una cámara en la cual se realiza la separación del flujo en una corriente de salida caliente y otra fría. Como resultado de lo anterior, se generan dentro del tubo flujos en forma de torbellino. Al entrar el aire al tubo se generan flujos en forma de vórtices los cuales viajan en direcciones contrarias a la misma velocidad angular y debido al principio de conservación del momento angular, el vórtice interno gana momento y se manifiesta en el vórtice exterior en forma de calor [64 – 66]. Un esquema del funcionamiento de este tubo se muestra en la Figura 33.

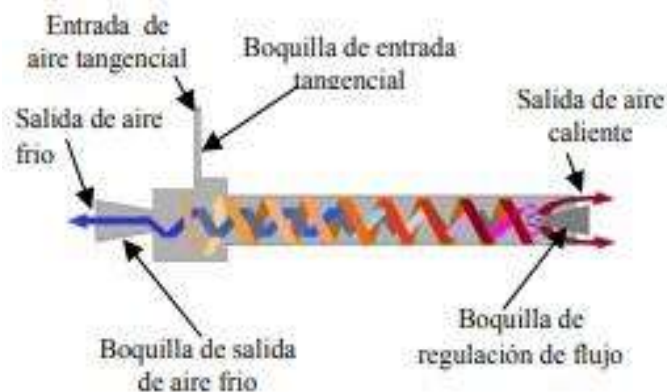


Figura 32. Tubo Ranque – Hilsch.

Esta propuesta consiste en inyectar el aire de manera lateral a través de la tobera, la cual está cerrada por la parte inferior hasta $2/3$ de su altura, de tal modo que el aire que llega por la entrada choque con las paredes y forme una rotación. Hasta el momento, fue imposible publicar los resultados obtenidos debido a que no quedaron terminados: solo se obtuvieron los tiempos de mezclado para los flujos a $0.75R$, por lo que los casos a $0.66R$ queda como

trabajo futuro. Este trabajo es de gran interés debido a que los resultados obtenidos hasta el momento, sugieren una reducción de los tiempos de mezclado mayor a los obtenidos con los modificadores de flujo.

Referencias

- [1] R. Gonzalez, G. Solorio, A. Ramos, E. Torres, C. Hernandez y R. Zenit; “Effect of the Fluid – Dynamic Structure on the Mixing Time of a Ladle Furnace”; Steel Research International, Vol. 55; No. 4; (2017); pp. 1 – 9.
- [2] R. P. Nunes, J.A.M. Pereira, A. C. F Vilela y F. T. V. Der Laan; “Visualisation and Analysis of the Fluid Flow Structure Inside an Elliptical Steelmaking Ladle Through Image Processing Techniques; Journal of Engineering Science and Technology; Vol. 2; No. 2; (2007); pp 139 – 150.
- [3] M. Terrazas y A. Conejo; “Effect of Nozzle Diameter on Mixing Time During Bottom – Gas Injection in Metallurgical Ladles”; Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. No. 46B; (2015); pp. 711 – 718.
- [4] G. G. Krishna, S. P. Mehrotra y A. Ghosh; “Experimental Investigation of Mixing Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath”; Metallurgical Transactions B; Vol. No. 19B; (1987); pp 839 – 850.
- [5] A. N. Conejo, S. Kitamura, N. Maruoka y S. Kim; “Effects of Top Layer, Nozzle Arrangement, and Gas Flow Rate on Mixing Time in Agitated Ladles by Bottom Gas Injection”; The Minerals & Materials Society and ASM International, Vol. 44B; (2013); pp. 914 – 923.
- [6] A. M. Amaro, M. A. Ramirez y A. N. Conejo; “Effect of Slag Properties on Mixing Phenomena in Gas – Stirred Ladles by Physical Modeling”; ISIJ International; Vol. 54; No. 1; (2014); pp 1 – 8.
- [7] S. Ni, H. Wang, J. Zhang, L. Lin y S. Chu; “A Novel Criterion of Mixing Time in Gas – Stirred Ladle Systems”; Acta Metall. Sin., Vol. 27; No. 6; (2014); pp. 1008 – 1011.
- [8] C. Chen, Q. Rui y G. Cheng; “Effect of Salt Tracer Amount on the Mixing Time Measurement in a Hydrodynamic Model of Gas – Stirred Ladle System”; Steel Research International, Vol. 84; No. 9; (2013); pp. 900 – 907.
- [9] H. Zambrano A. Bencomo, L. Trujillo y L. Di G. Sigalotti; “Numerical Simulation of a Gas – Stirred Ladle”; Selected Topics of Computational and Experimental Fluid Mechanics; (2015); pp 271 – 280.

- [10] L. Li, Z. Liu, B. Li, H. Matsuura y F. Tsukihashi; “Water Model and CFD – PBM Coupled Model of Gas – Liquid – Slag Three – Phase Flow in Ladle Metallurgy; ISIJ International; Vol. 55; No. 7; (2015); pp 1337 – 1346.
- [11] L. Li y B. Li; “Investigation of Bubble – Slag Layer Behaviors with Hybrid Eulerian – Lagrangian Modeling and Large Eddy Simulation”; The Minerals, Metals & Materials Society; (2016).
- [12] L. Li, Z. Liu, M. Cao y B. Li: “Large Eddy Simulation of Bubbly Flow and Slag Layer Behavior in Ladle with Discrete Phase Model (DPM) – Volume of Fluid (VOF) Coupled Model”, The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 67, No. 7 (2015), pp. 1459 – 1467.
- [13] T. Kuo y J. Kuo; “Determination of Mixing Time in a Measurement in a Ladle – Refining Process Using Optical Image Processing”; ISIJ International, Vol. 51; No. 10; (2011); pp. 1597 – 1600.
- [14] N. Shanqiang, C. Shaojun, Z. Jun y L. Zhongsi; “Water Model Study on Mixing Time in Shaking Ladle”; The Thirteenth International Ferroalloys Congress Efficient Technologies in Ferroally Industry; (2013).
- [15] D. Mazumdar, P. Dhandapani y R. Sarvanakumar; “Modeling and Optimisation of Gas Stirred Ladle Systems”; ISIJ International, Vol. 57; No. 2; (2017); pp. 286 – 295.
- [16] M. Vargas, J. A. Negrete, M. Díaz y R. A. Cruz; “Simulación Física de la Inyección de Gas en Horno Olla por Medio de Toberas de Diferentes Ángulos”; II Encuentro: participación de la Mujer en la Ciencia; (2005).
- [17] D. Mazumdar y R. I. L. Guthrie; “Numerical Computation of Flow and Mixing Time in Ladle Metallurgy Steelmaking Operations (C.A.S. Method)”; Appl. Math. Modelling, Vol. 10; (1986); pp. 25 – 32.
- [18] J. U. Becker y F. Oeters; “Model Experiments of Mixing in Steel Ladles with Continuous Addition of the Substance to be Mixed”; Steel Research, Vol. 69; No. 1; (1998); pp. 8 – 16.
- [19] L. W. Helle; “The Calculation of the Time Required to Mix Liquid Metal in a Ladle by Gas Rising”; Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy; (1981); pp. 329 – 337.

- [20] P. Gajjar, T. Haas, K. B. Owusu, M. Eickhoff, P. Kowitwarangkul y H. Pfeifer; “Physical Study of the Impact of Injector Design on Mixing, Convection and Turulence in Ladle Metallurgy”; *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 22; (2019); pp. 538 – 547.
- [21] M. A. Ramírez – Argaez, J. Tapia, J. Espinoza y E. Alcantar; “Modelación Matemática del Mezclado en Hornos – Cucharas Agitadas con Gas”; *Revista de Metalurgia*, Vol. 42; No. 1; (2006); pp. 52 – 75.
- [22] J. de J. Villela, J. A. Ramos, C. A. Hernandez, A. Urióstegui y G. Solorio; “Optimization of the Mixing Time Using Asymmetrical Arrays in Both Gas Flow and Injection Positions in a Dual – Plug Ladle”; *ISIJ International*; (2020); pp. 1 – 7.
- [23] A. S. Gómez, A. N. Conejo y R. Zenit; “Effect of Separation Angle and Nozzle Radial Position on Mixing Time in Ladles with Two Nozzles”; *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 11; No. 1; (2018); pp. 11 – 20.
- [24] F. A. Calderon, R. Morales, K. Chattopadhyay y S. Garcia; “Fluid Flow Turbulence in the Proximities of the Metal – Slag Interface in Ladle Stirring Operations”; *Metals*; (2019); pp. 1 – 17.
- [25] E. K. Ramasetti, VV. Visuri, P. Sulasalmi, T. Palovaara, A. K. Gupta y T. Fabritius; “Physical and CFD Modeling of the Effect of Top Layer Properties on the Formation of Open – Eye in Gas – Stirred Ladles with Single and Dual – Plugs”; *Steel Research International*; (2019); pp. 1 – 13.
- [26] S. Zheng y M. Zhu; “New Process with Argon Injected Into Ladle Around the Tapping Hole for Controlling Slag Carry – over During Continuous Casting Ladle”; *Metals*; (2018); pp. 1 – 10.
- [27] F. D. Maldonado – Parra, M. A. Ramirez, A. Nava y C. Gonzalez; “Effect of Both Radial Position and Number of Porous Pugs on Chemical and Thermal Mixing in an Industrial Ladle Involving Two Phase Flow”; *ISIJ International*, Vol. 51; (2011); pp. 1110 – 1118.
- [28] D. Geng, H. Lei y J. He; “Numerical Simulation for Collision and Growth of Inclusions in Ladles Stirred with Different Porous Plug Configurations”; *ISIJ International*, Vol. 50; (2010); pp. 1597 – 1605.

- [29] W. Lou y M. Zhu; “Numerical Simulations of Inclusion Behavior and Mixing Phenomena in Gas – Stirred Ladles with Different Arrangement of Tuyeres”; ISIJ International, Vol. 54; (2014); pp. 9 – 18.
- [30] S. W.P. Cloete, J. J. Eksteen y S. M. Bradshaw; “A Numerical Modelling Investigation into Design Variables Influencing Mixing Efficiency in Full Scale Gas Stirred Ladles”; Minerals Engineering, Vol. 46; (2013); pp. 16 – 24.
- [31] G. Chen y S. He; “Mixing Behavior in the RH Degasser with Bottom Gas Injection”; Vacuum, Vol. 130; (2016); pp. 48 – 55.
- [32] E. Brandaleze, W. Chiapparoli y L. Castellá; “Estudio Sobre Tapones Direccionales Utilizados en las Cucharas de Acería de Siderar”;
- [33] B. Trummer, W. Fellner, A. Viertauer, L. Kneis y G. Hackl; “A Water Modelling Comparison of Hybrid Plug, Slot Plug and Porous Plug Designs”;
- [34] S. Torres y M. A. Barron; “Numerical Simulations of an Argon Stirred Ladle with Top and Bottom Injection”; Open Journal of Applied Sciences, Vol. 6; (2016); pp. 860 – 867.
- [35] J. Aoki, y B. G. Thomas; “Experimental and Theoretical Investigation of Mixing in a Bottom Gas – Stirred Ladle”; AISTech, (2004); pp. 1 – 12.
- [36] Y. Liu, H. Bai, H. Liu, M. Ersson, P. G. Jonsson y Y. Gan; “Physical and Numerical Modelling on the Mixing Condition in a 50 t Ladle”; Metals; (2019); pp. 1 – 19.
- [37] H. Turkoglu y B. Farouk; “Mixing Time and Liquid Circulation in Steelmaking Ladles with Vertical Gas Injection”; ISIJ International, Vol. 31; No. 12; (1991); pp. 1371 – 1380.
- [38] M. A. Ramírez – Argaez, F. Contreras y C. González; “Modelación Matemática del Mezclado en Ollas (Cucharas) de Aluminio Equipadas con la Técnica de Desgasificación Rotor – Inyector”; Revista de Metalurgia, Vol. 42; No. 1; (2006); pp. 52 – 75.
- [39] S. Lin, D. Xie y H. Chen; “Numerical and Experimental Study on the Multiphase Flow in Gas – Carried Powder Injection Desulphurization Processes”; Asia – Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference; (2015); pp. 310 – 313.
- [40] M. G. Shen, D. H. Zhang, C. Wu, Q. Zu y Q. H. Qi; “Study on Stirring Behavior of Liquid Steel in Bottom – Blowing Ladle with Immersed Cylinder”; Metalurgija, Vol. 55; No. 4; (2016); pp. 601 – 604.

- [41] F. Tan, Z. He, S. Jin, L. Pan, Y. Li y B. Li; “Physical Modeling Evaluation on Refining Effects of Ladle with Different Purging Plug Designs”; *Steel Research International*, (2020); pp. 1 – 8.
- [42] K. Takahashi, Y. Sugo, Y. Takahata, H. Sekine y M. Nakamura; “Laminar Mixing in Stirred Tank Agitated by an Impeller Inclined”; *International Journal of Chemical Engineering*, (2012); pp. 1 – 10.
- [43] G. Solorio, R. D. Morales, J. Palafox, L. Garcia y A. Ramos; “Analysis of Fluid Flow Turbulence in Tundishes Fed by a Swirling Ladle Shroud”; *ISIJ International*; Vol. 44; (2004); pp 1024 – 1032.
- [44] S. Yu, Z. S. Zou, L. Shao y S. Louhenkilpi; “A Theoretical Scaling Equation for Designing Physical Modeling of Gas – Liquid Flow in Metallurgical Ladles”; *Steel Research*, Vol. 87; No. 9999; (2016); pp. 1 – 5.
- [45] K. Grigorovich, O. Komolova y D. Tenebikina; “Analysis and Optimization of Ladle Treatment Technology of Steels Processing”; *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 50; No. 6; (2015); pp. 574 – 580.
- [46] J. C. Urbina; “Simulación Matemática de la Inyección de un Flujo Rotacional de gas por el Fondo de la Olla de Colada Continua”; Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; (2010).
- [47] G. Irons, A. Senguttuvan y K. Krishnapisharody; “Recent Advances in the Fluid Dynamics of Ladle Metallurgy”; *ISIJ International*, Vol. 55; (2015); pp. 1 – 6.
- [48] J. P. Birat; “Impact of Steelmaking and Casting Technologies on Processing and Properties of Steel”; *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 28; No. 2; (2001); pp. 152 – 158.
- [49] S. Yu, Z. S. Zou, L. Shao y S. Louhenkilpi; “A Simple Mathematical Model for Estimating Plume Hydrodynamics of Metallurgical Ladles”; *ISIJ International*, Vol. 56; No. 7; (2016); pp. 1303 – 1305.
- [50] J. P. Bellot, V. D. Felice, B. Dussoubs, A. Jardy y S. Hans; “Coupling of CFD and PBE Calculations to Simulate the Behavior of an Inclusion Population in a Gas – Stirring Ladle”; *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*; Vol. 45B; (2014); pp 16 – 21.

- [51] V. D. Felice, I. L. A. Daoud, B. Dussoubs, A. Jardy y J. P. Bellot; “Numerical Modelling of Mixing Inclusion Behaviour in a Gas – Stirred Ladle”; ISIJ International, Vol. 52; (2012); pp. 1273 – 1280.
- [52] K. Krishnapisharody y G. Irons; “A Critical Review of the Modified Froude Number in Ladle Metallurgy”; Metallurgical and Materials Transactions B; Vol 44B; (2013); pp. 1486 – 1498.
- [53] Y. Xu, M. Ersson, y P. Jönsson: “Numerical Simulation of Single Argon Bubble Rising in Molten Metal under a Laminar Flow”, Steel Research International, Vol. 85, No. 9999 (2014), pp. 1 – 9.
- [54] J. Xiao, H. Yan, L. Liu, F. Möller, Z. Hu y S. Unger; “Effect of Bath Depth and Nozzle Geometry on Spout Height in Submerged Gas Injection at Bottom”; Metallurgical and Materials Transactions B; (2019).
- [55] J. E. Olsen y S. Cloete; “Coupled DPM and VOF Model for Analyses of Gas Stirred Ladles at Higher Gas Rates”; Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries; (2009); pp 1 – 6.
- [56] M. Peranandhanthan y D. Mazumdar; “Modeling of Slag Eye Area in Argon Stirred Ladles”; ISIJ International; Vol. 50; (2010); pp 1622 – 1631.
- [57] R. González; “Modelación Física de la Agitación del Acero Líquido Dentro del Horno Olla”; Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; (2008).
- [58] R. Bardera; “Aplicación del PIV a la Medida del Coeficiente de Resistencia Aerodinámica”; Tesis Doctoral en Ciencias Físicas; Universidad Complutense de Madrid; 2005.
- [59] I. Calderón: “Modelación Física de la Fluido dinámica del Acero Líquido en un Molde para Colar Palanquilla”, Tesis de Maestría en Ciencias en Metalurgia, Instituto Tecnológico de Morelia, (2013).
- [60] J. Szekely, “Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de Metales” Editorial Limusa, México, 2da. Ed., 1988.

- [61] S. Shing y S.C. Koria; “Tundish Steel Melt Dynamics with and without Flow Modifiers Through Physical Modeling”, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol.2; No.3; (1993); pp. 255.
- [62] M. Warzecha, J. Jowza y T. Merder; “Gas Mixing and Chemical Homogenization of Steel in 100 T Ladle Furnace”; *Metalurgija*, Vol. 46; No. 4; (2007); pp. 227 – 232.
- [63] G. Ascanio; “Mixing Time in Stirred Vessels: a Review of Experimental Techniques”; *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 23; (2015); pp. 1065 – 1076.
- [64] A. Cervantes, J. G. Velázquez, M. Jiménez, R. Gonzales, C. Rubio y C. Mendoza; “Construcción y Caracterización Termodinámica de un Tubo Ranque - Hilsch”; *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*; (2010).
- [65] A. Cervantes, J. G. Velázquez, F. Montejo, C. Rubio, G. Solorio y H. C. Gutiérrez; “Estudio Experimental del Fenómeno Ranque – Hilsch en un Tubo Vórtice”; *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*; (2010).
- [66] O. J. García, J. E. Muñoz y F. Fajardo; “Construcción y Caracterización de un Tubo Ranque Hilsch”; *Revista Brasileira de Ensino de Física*; Vol. 30; No. 4; (2008); pp 1 – 5.