



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA

**SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA INYECCIÓN DE UN
FLUJO ROTACIONAL DE GAS POR EL FONDO DE LA
OLLA DE COLADA CONTINUA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA
ING. JUAN CARLOS URBINA AVILA.

ASESOR DE TESIS
DR. GILDARDO SOLORIO DIAZ.

MORELIA, MICH. FEBRERO DEL 2010





INDICE	
Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	VI
Resumen	
CAPITULO I	
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	4
1.2.1 objetivos Específicos	5
1.3 Antecedentes	5
1.4 Justificación	8
CAPITULO II	
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Semblanza Histórica	10
2.2 Olla de acero	11
2.2.1 Clasificación de la olla según su operación	12
2.2.2 Operaciones Principales en la olla de refinación	13
2.3 Metalurgia en la Olla de Colada Continua	14
2.3.1 Desfosforación	14
2.3.2 Desoxidación	15
2.3.3 Decarburación	15
2.3.4 Desulfuración	16
2.3.5 Desgasificación	16
2.3.6 Tratamiento con calcio	17
2.4 Comportamiento del Flujo en la Olla de Acero	17
2.4.1 Medios de Agitación del Metal Líquido en el Horno Olla	18
2.5 Tipos de Tapones Porosos	19
2.6 Energía de Agitación	20
2.7 Tiempo de Mezclado	20
2.8 Características del flujo en la olla	20
2.8.1 Clasificación del Campo de Flujo en un Baño con Inyección de Gas por el Fondo	21
2.9 Patrones de Dispersión de Burbujas	23
2.10 Técnicas Utilizadas en el Análisis de Flujo de Fluidos	25
2.10.1 Técnica Colorimétrica	25
2.10.2 Técnicas de Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV)	25
2.10.3 Técnicas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD)	26
2.10.3.1 Simulación Matemática	26
2.10.3.2 Modelo Matemático	27
2.10.3.3 Geometría y Mallado	27



2.10.3.4 Condiciones de Frontera y Condiciones Iniciales	27
2.10.3.5 Elección del Modelo	28
2.10.3.6 Fluent®	29

CAPITULO III

3.1 Simulación Matemática	29
3.1.1 Introducción	29
3.2 Modelo Matemático	30
3.3 Modelo Euleriano de dos Fases	31
3.4 Modelo de Turbulencia K- ϵ	31
3.5 Ecuaciones Fundamentales	31
3.6 Modelo Virtual de la Olla	33
3.7 Método Numérico	34
3.8 Procedimiento Iterativo del Método Numérico	35
3.9 Condiciones Iniciales y de Frontera	36

CAPITULO IV

4.1 Análisis de Flujo de Fluidos Mediante Simulación Matemática	36
4.2 Fluidos de Trabajo	37
4.3 Caso que se Estudio	37
4.4 Validación de los Modelos Matemáticos	38
4.5 Comparación de los Resultados Experimentales con los Resultados del Modelo Matemático	39
4.6 Diseño del Modificador de Flujo	54
4.7 Análisis de Flujo de Fluidos con el Modificador de Flujo	55
4.8 Conclusiones	61
Referencias	62



LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

INTRODUCCION

PAG

FIGURA 1.1 Horno Cuchara (Ladle Furnace: LF) 2

FIGURA 1.2 Esquema de la circulación de una pluma de gas en acero liquido 3

CAPITULO II

MARCO TEORICO

FIGURA 2.1 Esquema del proceso de colada continua 10

FIGURA 2.2 Clasificación esquemática de los diferentes equipos utilizados en el proceso de refinación secundaria de acuerdo a su operación [38]. 13

FIGURA 2.3 Inyección de gas argón a) a través de una lanza y b) a través de un tapón poroso [45]. 18

FIGURA 2.4 Tapones porosos: a) Tobera porosa, b) y C) Toberas porosas con canales direccionales, d) Sección transversa de un tapón poroso instalado [41]. 19

FIGURA 2.5 Clasificación del Campo de Flujo con Inyección Inferior del Gas en el Horno Olla [45]. 21

FIGURA 2.6 Desplazamiento radial del chorro de burbujas [45]. 22

FIGURA 2.7 a) Burbujeo y b) Chorro [45]. 23

CAPITULO III

SIMULACION MATEMATICA

FIGURA 3.1 Modelo de la olla y condiciones de frontera. 33



FIGURA 3.2 Dimensiones de la olla y localización de los medios porosos. 33

FIGURA 3.3 Dominio virtual en 3D generado por CFD con aproximadamente 600,000 celdas. 34

FIGURA 3.4 Diagrama de flujo que se siguió para la realización de las simulaciones 35

CAPITULO IV

VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

FIGURA 4.1 Vista isométrica en 3D de la olla, donde se aprecia la fracción de aire cuando la altura en el baño es 456 mm. 37

FIGURA 4.2 Plano central de inyección de la olla. 40

FIGURA 4.3 Plano de vectores obtenidos mediante simulación matemática en 2D, para dos fases, modelo de turbulencia K-épsilon y sus variantes, a) k-épsilon estándar y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario b) k-épsilon rng y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario c) k- épsilon realizable y modelo multifásico Euleriano, estado Estacionario d) k-épsilon estándar y modelo multifásico VOF, estado no estacionario a un tiempo de 5segundos 41

FIGURA 4.4 Patrón de flujo del caso estudiado con un flujo de aire de 4.9 lts/min a) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por PIV. 42

FIGURA 4.5 a) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico VOF y con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar, estado no estacionario a un tiempo de 5 segundos b) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico Euleriano y con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar, estado estacionario c) fotografía a un tiempo de 10 segundos después de haber inyectado colorante en el experimento físico. 42

FIGURA 4.6 Vectores de velocidad en el plano central de inyección simulación matemática en dos dimensiones en estado estacionario con el modelo multifásico Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar y b) obtenidos con la técnica PIV en la experimentación física. 44



- FIGURA 4.7** Plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K-épsilon estándar en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) segundo orden, c) tercer orden, d) quick y e) power law. 45
- FIGURA 4.8** Plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K-épsilon rng en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) segundo orden, c) tercer orden, d) quick y e) power law. 46
- FIGURA 4.9** Plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K-épsilon realizable en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) power law, c) tercer orden y d) quick. 47
- FIGURA 4.10** a) simulación matemática en estado estacionario usando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar con el modelo de discretización de ecuaciones quick, b) experimentación física. 48
- FIGURA 4.11** a) y b) simulación matemática en estado no estacionario a un tiempo de convergencia de 5 y 60 segundos respectivamente usando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar con el modelo de discretización de ecuaciones quick, c) experimentación física. 49
- FIGURA 4.12** Comportamiento de la pluma de gas en el baño líquido, y c) simulación matemática a un tiempo de convergencia de 50 y 60 segundos respectivamente b) y d) experimentación física. 51
- FIGURA 4.13** Posición de de los sensores en la olla. 52
- FIGURA 4.14** Grafica de tiempos de mezclado del sensor 2 tanto para la simulación matemática como para la experimentación física. 52
- FIGURA 4.15** Grafica de tiempos de mezclado del sensor 1 tanto para la simulación matemática como para la experimentación física. 53
- FIGURA 4.16** Diseño del modificador de flujo. 54



FIGURA 4.17 a) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano y con el modelo de turbulencia RSM, (plano central de inyección) y b) fotografía de inyección de colorante en el experimento físico, para los dos casos en inyección con modificador de flujo. 57

FIGURA 4.18 plano central de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en estado no estacionario con el modelo multifásico de fluido Euleriano a) con el modificador de flujo (modelo de turbulencia RSM) Y b) sin modificador (modelo de turbulencia k-épsilon estándar). 58

FIGURA 4.19 vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano en estado no estacionario (planos horizontales) a) y c) con modificador de flujo a 100 mm y a 200 mm respectivamente (modelo de turbulencia RSM) y b) y d) sin modificador a 100 mm y a 200 mm respectivamente (modelo de turbulencia k-épsilon estándar). 58

FIGURA 4.20 vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano en estado no estacionario (planos horizontales) a) y c) con modificador de flujo a 300 mm y a 400 mm respectivamente (modelo de turbulencia RSM) y b) y d) sin modificador a 300 mm y a 400 mm respectivamente (modelo de turbulencia k-épsilon estándar). 59

FIGURA 4.21 grafica de tiempos de mezclado obtenida mediante experimentación física, para el caso con modificador de flujo. 60

FIGURA 4.22 grafica de tiempos de mezclado obtenida mediante experimentación física, para el caso sin modificador. 60

LISTA DE TABLAS

CAPITULO IV

VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLA 4.1 Propiedades del agua, aire, argón y acero. 37

TABLA 4.2 Caso que se simulo. 38

TABLA 4.3 Caso simulado para validación. 39

RESUMEN

En éste proyecto de investigación se realizó la validación de la inyección de gas por el fondo de la olla de colada continua sin modificador de flujo mediante un modelo matemático contra resultados de un experimento físico, se realizaron simulaciones en dos dimensiones con los modelos multifásicos de fluido VOF y Euleriano, de estas simulaciones resulto que el modelo multifásico que mejor representa el comportamiento de flujo de fluidos en la olla es el modelo EULERIANO, después se realizaron simulaciones en tres dimensiones con el modelo multifásico de fluido Euleriano y con el modelo de turbulencia k-épsilon en sus tres variantes (estándar, rng y realizable) y con diferentes modelos de discretización de ecuaciones, resultando que el modelo multifásico de fluido Euleriano en combinación con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar y con el modelo de discretización de ecuaciones Quick son los que mejor representan el perfil de flujo que se presenta en la olla cuando se inyecta gas por el fondo, también se midieron los tiempos de mezclado en la olla mediante simulación matemática, para esto se inyectó un trazador con propiedades similares a las del agua y para medir el tiempo de mezclado se posicionaron dos sensores en la olla uno en la parte superior y otro en la parte inferior de esta, el resultado demostró que el modelo matemático representa de manera fiel lo que sucede en la realidad ya que los tiempos de mezclado fueron los mismos que los obtenidos en la experimentación física. También se realizó la simulación matemática y física de la inyección de gas por el fondo de la olla de colada continua mediante un dispositivo modificador de flujo, en esta parte se realizó la simulación matemática usando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia RSM en combinación con el modelo de discretización de ecuaciones de segundo orden y para validar este modelo se realizó la experimentación física donde se inyectó colorante vegetal rojo para describir el comportamiento del flujo en la olla y se midió el tiempo de mezclado en la experimentación física, donde se encontró que el tiempo de mezclado no se reduce en comparación con la inyección de gas sin modificador de flujo sin embargo si se tiene una mejor homogeneización de la composición ya que las curvas de los dos sensores se encuentran más unidas al tiempo de alcanzar el tiempo de mezclado deseado, esto es debido a que se tiene una mayor generación de turbulencia y una transferencia de cantidad de movimiento más eficiente que para el caso sin modificador ya que esta transferencia es llevada a cabo no solo en dirección vertical sino también en dirección radial.



CAPITULO I

1.1 Introducción

El tratamiento de acero en la olla empezó aproximadamente hace 45 años, donde los procesos de desgasificado al vacío aparecieron con el fin de remover el hidrogeno del acero líquido. En los años 50`s los procesos Dortmund-Hoerder (DH) y Ruhrstahl-Heraeus (RH) fueron muy populares. A mediados de los años 60`s los procesos de desgasificación del acero al vacío (VAD), el proceso ASEA-SKF y el proceso de decarburización con oxígeno al vacío (VOD) aparecieron para fabricar aceros al alto cromo, en los 70`s el proceso de decarburización mediante la inyección de oxígeno y argón (AOD) fue introducido, y hasta la fecha es el proceso preferido para fabricar aceros especiales y aceros inoxidable, así pues, la inyección de un gas y de preferencia inerte, empezó a funcionar excelentemente en el proceso de refinación secundaria para mejorar el control de la composición química, la flotación de las inclusiones, así como también lograr un baño más homogéneo desde el punto de vista térmico. En la actualidad todas las técnicas de refinación secundaria más utilizadas inyectan gases para agitar el baño metálico, ya sea por medio de toberas, lanzas sumergidas o tapones porosos. Este gas al ir ascendiendo a través del acero líquido lo agita acelerando las reacciones químicas, favoreciendo la homogenización en la temperatura y la composición, así mismo mediante la generación de turbulencia ayuda a la aglomeración y flotación de las inclusiones. De esta manera la inyección de un gas inerte (hidrogeno, argón, helio) en el seno del baño metálico contenido en la olla es una de las técnicas más empleadas actualmente en las industrias metalúrgicas para incrementar las velocidades de las reacciones químicas, homogeneización de la composición química, remoción de partículas, eliminación de la estratificación de la temperatura, etc. ^[1].

Todos los aspectos mencionados se han venido dando de manera gradual ya que en la actualidad los requerimientos exigidos a los aceros son cada día más estrictos que hace una década, la demanda por aceros más limpios, con bajos niveles en los contenidos de azufre, ultra bajos contenidos de gases como N_2 e H_2 , etc. Ha hecho que los productores de acero se hayan visto en la necesidad de introducir nuevos esquemas o filosofías de operación para tener un control más estricto de la temperatura, composición y del número de inclusiones presentes en el acero líquido. Las inclusiones no metálicas se generan durante el proceso de elaboración del acero, ya sea por las reacciones que ocurren en el baño metálico (por ejemplo durante la desoxidación) como por la interacción con agentes externos (refractarios, escorias,





etc.).Las inclusiones perjudican las propiedades mecánicas de los productos finales así como también pueden provocar problemas en el proceso de colada ^[2]. Este tema ha llegado a ser uno de los principales objetivos de estudio en el proceso de la fabricación del acero, particularmente las pequeñas inclusiones de menos de 30 μm de diámetro que son más difíciles de remover.

En este contexto de elevar la calidad de los productos de acero, la metalurgia secundaria o metalurgia de la olla juega un papel preponderante en la industria siderúrgica moderna, ya que es ahí donde se lleva acabo principalmente la desulfuración, desoxidación y el ajuste de la composición química final. Una vez fundida la carga metálica en las unidades de producción de acero, este es vaciado en la olla donde se realizan las tareas de refinación y aleación del acero. Esta unidad se utiliza para realizar el ajuste final de la composición. Se puede ver en la fig. 1.1 las distintas partes que componen lo que se llama el horno cuchara. Los electrodos permiten mantener un control más preciso de la temperatura del acero calentándolo según sea la necesidad. Los taponos porosos son para inyectar argón en el metal líquido para agitarlo mecánicamente, y así homogeneizar composición y temperatura. Este agitado fomenta también las reacciones metal-escoria. Finalmente la tolva superior permite realizar las adiciones de aleantes y escorificantes requeridas durante el tratamiento ^[3].

Ladle Furnace (LF)

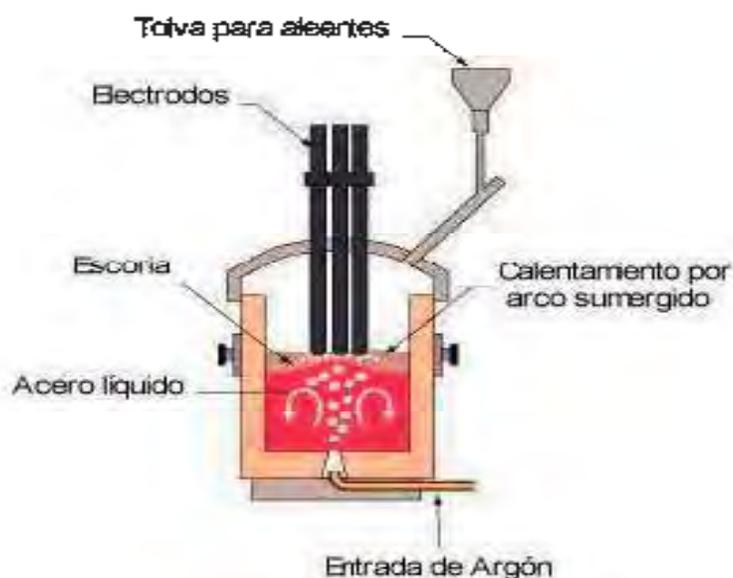


Figura 1.1 Horno Cuchara (Ladle Furnace: LF)





A pesar de que el uso de la inyección de gases por el fondo de la olla a fundidos metálicos es una tecnología bastante madura, existen ciertos aspectos del proceso que aun necesitan comprenderse para poder usar sabiamente esta inyección u optimización del proceso. En varias plantas siderúrgicas que cuentan con este proceso inyectan el fluido por medio de toberas porosas en donde la pluma de gas deja zonas muertas o de estancamiento en el reactor, sobre todo en la parte baja del mismo, este fenómeno se puede apreciar en la figura 1.2, donde se observa la inyección de gas argón por el fondo de la olla donde el dispositivo de inyección se encuentra en el centro de esta, de ahí que en este sentido se pretenda diseñar y emplear nuevos diseños de dispositivos de inyección de gas, que permitan el ascenso rotacional de las burbujas de gas, con lo cual se pretende reducir las zonas estancadas, así como el tiempo de mezclado, homogenización de la temperatura y de la composición química, acelerar la cinética de las reacciones químicas, incrementar la remoción de inclusiones y por lo tanto coadyuvar a obtener un producto de mejor calidad a un más bajo costo.

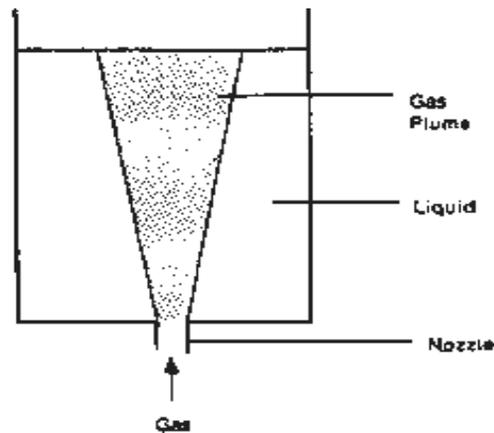


Figura 1.2 esquema de la circulación de una pluma de gas en acero liquido.

Y dadas las limitaciones desde el punto de vista de costos y operacional para realizar experimentación en planta, se pretende hacer uso de las poderosas herramientas de la modelación física y matemática. Para el caso de la modelación física se cuenta con un modelo de acrílico transparente a escala en donde los fluidos de trabajo que modelaran el acero liquido y el gas argón serán el agua y el aire, respetando los criterios de similitud ^[4]. Por parte de la modelación matemática, se pretende realizar en un paquete comercial de CFD (Computacional Fluid Dynamics) que es Fluent[®], del cual se cuenta con una licencia en





nuestro programa de posgrado, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por lo cual se trabajara con este software.

1.2 Objetivo General

Estudiar el efecto de la inyección de un patrón de flujo rotacional de gas por el fondo del horno olla mediante simulación matemática.

1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Validar el modelo matemático con los resultados obtenidos en la experimentación física, la cual ya fue realizada en otro trabajo de tesis. ^[5]
- b) Diseñar un dispositivo que nos permita generar un patrón de flujo rotacional.
- c) Medir mediante los tiempos de mezclado en la agitación del horno olla con el flujo rotacional.
- d) Comparar los tiempos de mezclado en la inyección con tapón poroso y en la inyección con el dispositivo diseñado.

1.3 Antecedentes

En las últimas tres décadas ha habido un considerable esfuerzo en mejorar y desarrollar nuevos procesos para la refinación secundaria del acero. Es clara la dificultad de llevar a cabo ciertos aspectos de refinado bajo condiciones oxidantes, tal es el caso de la operación de hornos básicos al oxígeno y el horno de arco eléctrico. Por ejemplo la desulfuración es mejor llevada bajo condiciones reductoras o cuando el contenido de oxígeno en el metal fundido es muy bajo ^[6], así pues el llevar este tipo de operaciones a unidades externas de los hornos de fusión ha permitido un ahorro sustancial en tiempo y dinero. Este tipo de operaciones y nuevos procesos es lo que ahora se conoce como metalurgia secundaria y es llevada a cabo en reactores denominados cucharas u ollas metalúrgicas. En este aspecto, muy recientemente ha venido creciendo el interés en la industria del acero por entender la dinámica de fluidos, la transferencia de masa y los fenómenos de transferencia de calor que existen en la metalurgia de la olla ^[7], especialmente en los reactores agitados por la acción de plumas de gas inyectado por el fondo de los mismos con el fin de lograr una optimización del proceso ^[8]. Existen un gran número de trabajos de investigación que han permitido obtener correlaciones para el tiempo de mezclado en función del flujo de gas, altura





del acero y radio de la olla, así como para la energía de agitación del baño metálico, buscando siempre mejorar la calidad del producto a un más bajo costo de operación.

Existen numerosas investigaciones basadas en la modelación física ^[9, 10, 11], y matemática ^[12], acerca de los fenómenos de transporte que ocurren en la olla, lo cual indica el enorme interés que existe por la comunidad científica en entender los fenómenos que existen en la olla metalúrgica. Hace poco más de una década, Mazumdar y Guthrie ^[13], realizaron una revisión bibliográfica de estudios realizados en el horno olla (HO) y ellos clasificaron los estudios basados en los fenómenos de transporte en las siguientes categorías:

- 1) Estudios de modelación física.
- 2) Estudios combinados de modelación física y matemática.
- 3) Estudios de modelación matemática.

Debido a las dificultades en experimentar con el acero desde el punto de vista operativo hasta el de los costos, así como realizar la medición de las variables del proceso, como velocidades de ascenso de las burbujas, fracción volumétrica del gas, tamaño de la burbuja, etc., de ahí la necesidad de emplear los modelos matemáticos y físicos ^[14].

En este aspecto se han realizado bastantes contribuciones tal como la de Krishnamurthy ^[15] en donde se construyó un modelo físico de agua y aire para estudiar el efecto del gas y la altura del baño líquido sobre el mezclado ^[16], donde se inyectó como soluto cloruro de potasio (KCL) a un baño de agua destilada, para posteriormente utilizar la técnica de conductimetría y obtener los tiempos de mezclado al 99.5%. En este trabajo se obtuvo que el tiempo de mezclado disminuye con la disminución de la altura del baño y el flujo de gas, cabe señalar que no se pueden comparar los tiempos de mezclado, debido a que se varió la altura del baño. Oeters ^[17,18] estudió el efecto del flujo de gas y la posición de la boquilla sobre el tiempo de mezclado mediante el uso de un modelo físico aire-agua, afirmando que cuando se inyecta con un solo tapón, la inyección debe realizarse en forma excéntrica para reducir las zonas muertas y por tanto el tiempo de mezclado.

Más recientemente Iguchi ^[19] realizó otro modelo físico agua-aire para estudiar el tiempo de mezclado, en este trabajo se utilizó como trazador cloruro de sodio (NaCl).

Takatzuka e Iguchi ^[20] estudiaron el movimiento angular de las burbujas empleando tres diferentes modelos físicos cada uno con diámetro diferente y en cada uno trabajaron diferentes alturas, en estos trabajos se inyectó aire concéntricamente, en donde se determinó





que el movimiento angular de las burbujas afecta las relaciones altura/diámetro entre 0.3-1; así mismo, se obtuvo una correlación para el tiempo de mezclado en donde se considera el movimiento angular de las burbujas. También, dentro de los trabajos de investigación respecto a la inyección de gases a metales fundidos podemos encontrar algunas patentes, tal es el caso de la desarrollada por Aramaki ^[21], en donde se diseñó un sistema de inyección para la agitación vertical en la olla a través de un medio poroso.

Un buen número de investigadores han analizado el comportamiento de las burbujas de gas y la remoción de inclusiones en el acero líquido ^[22]. Los resultados demuestran que el tamaño pequeño de burbuja es benéfico para la remoción de inclusiones por adhesión. Pero el tamaño de las burbujas generadas por la inyección de gas con tapón poroso, toberas y con lancetas son típicamente de 10 a 20 mm de diámetro. En este aspecto se han realizado bastantes contribuciones tal como la de:

Zhang et al, quien desarrolló un método para generar burbujas finas por medio de la inyección de gas en la buza de salida de la olla al distribuidor en el sistema de colada continua. En esta tecnología, el gas inyectado es dispersado en burbujas finas dentro del acero líquido con una intensa fuerza turbulenta, las cuales pueden colisionar con las partículas de inclusiones y flotar a la superficie del acero líquido.

Aunque Zhang et al. A obtenido datos y resultados valiosos en la experimentación con modelos de agua, los defectos son inevitables, la discrepancia entre las estructuras de la buza de salida del experimento del modelo de agua de Zhang y la de la buza usada en la práctica es obvia; el índice de flujo de gas óptimo y el tamaño de la nariz para generar un apropiado tamaño de burbuja fina no ha sido obtenido. Por lo tanto es necesario estudiarlo más y mejorar la tecnología.

Con respecto a estudios basados en la modelación matemática, existen 2 tipos de modelos basados en técnicas numéricas para resolver el problema de la inyección de gases: 1) modelos de fase cuasi-simple ^[13,23-24] y 2) modelos bifásicos. Los modelos de fase cuasi-simple solo resolverán las ecuaciones de conservación para la fase líquida y su ineficiencia consiste en que se debe conocer primero la forma y distribución de la pluma generada por la inyección de gas. Contrariamente, los modelos bifásicos no necesitan conocer a priori tales variables, pero si requieren de algunos parámetros empíricos obtenidos a través de modelos experimentales, como el coeficiente de arrastre, de transferencia de calor y masa, entre otros.





Los modelos bifásicos se subdividen a su vez en dos grupos: 1) los que trabajan bajo un marco de referencia Euleriano-Euleriano ^[25-26] y 2) los que trabajan en un marco de referencia Euleriano-Lagrangeano ^[27-28], los primeros resuelven las ecuaciones de conservación para las dos fases, mientras que los segundos resuelven las ecuaciones de conservación solo para la fase continua o fase líquida y la fase dispersa o gaseosa se trata como partículas individuales, para las cuales se resuelve una ecuación de trayectoria para cada partícula y además para emplear este tipo de modelos se debe determinar primero el campo de flujo de la fase continua.

Con el aumento en la capacidad de cómputo se ha dejado de lado el uso de los modelos cuasi-simples y se trabaja ahora en su mayoría con modelos bifásicos. Los modelos matemáticos trifásicos son escasos y no han sido completamente validados dada su complejidad.

Los modelos numéricos que se han reportado hasta ahora han discutido y analizado diferentes aspectos relacionados con la metalurgia de la olla ^[29-30], e inclusive en algunos otros, la capa de escoria fue tomada en consideración para realizar la simulación de flujo de fluidos y transferencia de calor, lo que constituye un modelo trifásico (gas-acero-escoria) ^[31-32].

Para medir el tiempo de mezclado de una olla de aleación en Rautsruukki se desarrolló un modelo matemático con el cual las velocidades pronosticadas fueron muy semejantes a las medidas, lo que demostró la efectividad del modelo para usarse como un parámetro de estudio acerca de cómo la localización de los tapones porosos influyen en la mezcla de la aleación. Los resultados del estudio muestran que la localización de los tapones porosos tiene efecto sobre el campo de flujo. Los tapones porosos localizados cerca de la pared de la olla causan una recirculación cerca de la pared en las proximidades de los tapones porosos. En el campo de flujo se encontró que el mejor lugar para posicionar el tapón poroso es en el centro de la olla, y con esto se favorece la eliminación de zonas muertas ^[12].

También se ha estudiado el flujo de fluidos y el fenómeno de mezclado en el agitado de las ollas de refinación mediante multitoberas de inyección. Para lo cual se usó la simulación física y matemática ^[22], donde se consideraron los efectos de la posición de adición del trazador, el arreglo de las toberas y el flujo del gas inyectado, donde concluyeron lo siguiente:

- 1) La configuración de las toberas tiene una gran influencia en el flujo del fluido y el mezclado en las ollas. Los arreglos asimétricos están a favor del incremento del





- momento angular mientras que en el caso de los arreglos simétricos casi no hay movimiento angular en las ollas.
- 2) El tiempo de mezclado es grandemente influenciado por la posición de la agregación del trazador, especialmente en el caso de un arreglo exactamente simétrico de las toberas.
 - 3) Es posible obtener un flujo moderado pero un rápido mezclado en la olla por medio del uso de multi-burbujeo. Dos toberas posicionadas opuestamente a una mitad del radio en la olla, muestran el mejor arreglo para realizar la mayoría de los propósitos de la refinación secundaria.
 - 4) Generalmente el tiempo de mezclado se reduce con el incremento del flujo de gas, pero el efecto no es muy bueno.
 - 5) Los resultados esperados por el uso del modelo matemático, concuerdan muy bien con los resultados obtenidos.

Las características del efecto del baño respecto al radio y el índice de flujo de gas inyectado en el mezclado se han investigado ^[33], y los resultados revelan que la relación (H_i/D) y el flujo de gas inyectado juegan un papel importante en el proceso de agitación del baño metálico. Cuando la relación (H_i/D) es pequeña (menos de uno), el gas puede salir del líquido más fácilmente y una columna de gas se forma alrededor del eje de la tobera de inyección. El poder de mezclado se incrementa con el aumento de la altura del baño debido a, el aumento de la fuerza de flotación de la burbuja y a la fase de dispersión. Sin embargo, con el incremento de la altura del baño, las pérdidas debidas a la fricción en las paredes llegan a ser importantes. Los resultados revelan que una relación entre el baño respecto del radio de 1.5 da la más alta eficiencia de mezclado. La contribución de la energía cinética del gas a la salida de la tobera para el poder de mezclado es pequeña comparada con el trabajo hecho por la flotación de las burbujas de este ^[16].

1.4 Justificación

Dentro de los estudios que existen sobre el fenómeno que ocurre durante el proceso de agitación de las ollas de acero se encuentran numerosos modelos físicos y matemáticos, para comprender la fenomenología y el comportamiento de la pluma de gas dentro de la olla de refinación de acero y así poder optimizar el proceso, minimizando el tiempo de mezclado (tiempo durante el cual se homogeniza el baño en un 95%), reduciendo la erosión sobre las





paredes del refractario, y alcanzar el máximo en cuanto a remoción de inclusiones. Dentro de estos modelos realizados se han estudiado diferentes configuraciones de tapones porosos localizados en el fondo de la olla como son, un solo tapón poroso a diferentes distancias del centro de la olla a la pared, también existen una gran variedad de estudios que tienen configuraciones de 2 tapones porosos a diferentes distancias del centro de la olla a la pared y a diferentes ángulos de separación entre sí, pero tanto el mezclado, como la remoción de inclusiones y la transferencia de calor no se han podido representar correctamente y aún hay aspectos que requieren su estudio. Tal es el caso del uso global de toberas para agitación, las cuales forman plumas verticales, dejando grandes zonas de estancamiento en el reactor, lo cual dificulta la remoción de las inclusiones más pequeñas, que son fuertemente influenciadas por el movimiento del flujo de fluidos de la fase líquida, lo cual perjudica además del tiempo de mezclado la homogenización química y térmica, obteniéndose un producto de mala calidad y a un más elevado costo, con todo lo citado anteriormente y a pesar del gran esfuerzo y trabajo realizado por los investigadores, en la información que existe en la literatura relacionada con la inyección de gas en el fondo de la olla, empleando toberas, no existe un estudio que proporcione información acerca de la modificación de la tobera que permita que las burbujas generadas entren al baño en forma rotatoria, con lo cual, se pretende eliminar las zonas muertas en la parte baja del horno disminuyendo con esto el tiempo de mezclado del reactor, asimismo, al modificar el patrón de flujo en el reactor se lograría eliminar las vorticidades que atrapan en su interior el transporte de las inclusiones más pequeñas y que no permiten que estas asciendan hacia la escoria, con esto lo que se pretende lograr es un mejor aprovechamiento de la energía de agitación con menores o iguales cargas de gas, elevando indiscutiblemente la calidad del acero líquido. De ahí el interés en realizar este tipo de estudio [14].

CAPITULO II

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Semblanza Histórica

En los últimos años se ha puesto un gran interés al proceso de refinación secundaria, ya que es donde radica el mayor número de operaciones para el tratamiento final de acero fundido. Específicamente, la olla constituye una parte importante en el control de la



temperatura y la composición química del acero en estado líquido. Este recipiente se ha convertido en un paso intermedio establecido en la secuencia global de la fabricación del acero, que incluye a la agitación del baño metálico por medio de la inyección de un gas inerte como el argón, la homogeneización del baño para incorporar aleaciones metálicas, el control en la temperatura de colada durante la refinación y el control de inclusiones no metálicas por medio de modificadores de flujo. Un boceto típico del funcionamiento de la metalurgia de olla se muestra en la figura 2.1 donde se observan los elementos que constituyen el proceso de colada continua ^[34, 35].

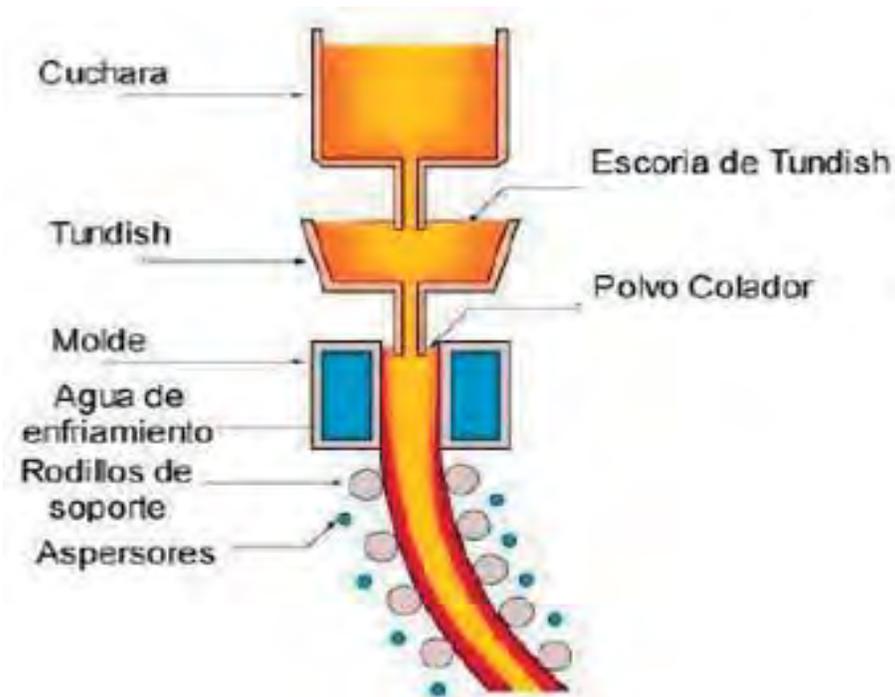


Figura 2.1 esquema del proceso de colada continua.

En general la operación de estos sistemas involucra la agitación de baños de acero que pueden ir de 5 a 250 toneladas de capacidad, para lograr una buena homogeneización del baño, mediante corrientes de inyección de gas, sistemas que manejan circulación al vacío y campos de fuerza electromagnéticos. Fue a finales de la década de los setenta cuando surgieron estudios sobre los fenómenos ocurridos en el proceso de refinación secundaria para recipientes y reactores metalúrgicos, pero fue hasta la década de los noventa cuando se intensificó la investigación a los diferentes problemas de operación.

El proceso de refinación secundaria consiste en el tratamiento de baños de acero en estado líquido proveniente del convertidor básico con oxígeno (COBOX) u hornos básicos de



arco eléctrico (HEA) hasta la solidificación en moldes de colada continua. Los equipos principales que forman parte del proceso de colada continua son: la olla, el distribuidor y el molde.

Durante la evolución de estos equipos metalúrgicos, se encuentran algunas adaptaciones tecnológicas con el propósito de producir aceros de mayor valor para nuevas aplicaciones.

Algunas ollas de acero cuentan con una sofisticada composición química en el ladrillo refractario que cubre la bóveda interna. Durante el proceso de operación, usualmente se incluyen tapones porosos estratégicamente colados en el fondo para la inyección de un gas inerte, otras están equipadas con una válvula deslizante en la boquilla de salida e incluso mecanismos de agitación magnética, entre otros aditamentos como arcos eléctricos para recalentamiento y cubiertas especiales para desgasificación al vacío.

Los distribuidores de colada continua son reactores cuya función principal es la de recibir el acero proveniente de la olla, contener el metal fundido y entregar el acero en forma constante al molde para su solidificación. Entre sus adaptaciones internas dependiendo del diseño y capacidad se encuentran: una o dos represas en el fondo, inhibidor de turbulencia, mamparas y deflectores en las paredes ^[36].

2.2 La Olla de Acero

La olla de acero es quizá uno de los recipientes metalúrgicos más importantes dentro de la industria acerera, ya que es aquí donde radica el control en la mayor parte de las variables del proceso, tanto químicas, termodinámicas, físicas, térmicas y por consiguiente la composición del producto final. La olla es básicamente un reactor metalúrgico que inicia el proceso de colada continua, después de recibir el acero de los hornos de fusión.

El recipiente de acero está revestido primero con una capa de ladrillo aislante y con ladrillo refractario para la superficie de trabajo expuesta al acero, que usualmente es del tipo de 90 a 95% de alúmina. El desgaste de los bloques refractarios es inevitable, por lo que debe revestirse cada cierto periodo de tiempo. Los grados de más alta alúmina dan una vida mucho más larga, pero son desproporcionalmente más caros por lo que no se usan con frecuencia para toda la bóveda, excepto para las hiladas superiores del ladrillo que están expuestas a la acción corrosiva de la escoria por un tiempo prolongado, ya que estas tienden a fallar prematuramente.





Por lo general, se fabrican de ladrillo con más alúmina, usualmente hasta un 80%. Estos ladrillos se usan algunas veces para toda la olla; otras son revestidas incluso con ladrillos de magnesita, dolomita y otros materiales de composición básica.

Una de las funciones principales de la olla es contener el acero en estado líquido durante las operaciones de refinación, además, el mantener una temperatura adecuada con pérdidas mínimas de calor y entregar el acero limpio al distribuidor de colada continua ^[36, 37].

2.2.1 Clasificación de la Olla Según su Operación

En los desarrollos industriales de la actualidad, se pueden observar una cantidad enorme de beneficios e investigaciones sobre numerosos aspectos de la olla metalúrgica. Generalmente, se aprecia que además de la química del proceso, los fenómenos de flujo de fluido, (patrones de flujo y la magnitud en la agitación) son factores importantes en la determinación de la eficiencia global de las operaciones de refinación. En general, durante el procesamiento del acero los sistemas varían de acuerdo a la operación en curso y al tipo de producto que se desea. Por ejemplo, la agitación mediante la inyección de una corriente de gas inerte, el recalentamiento por flujos conducidos en vacío o por el uso de un campo de fuerza electromagnética.

En la figura 2.2 se aprecian una gama de procesos de refinación clasificados de acuerdo al tipo de operación que se requiere. Sin embargo, en los procesos modernos existen ollas capaces de realizar múltiples funciones sin la necesidad de cambios de recipiente contenedor ^[35, 36, 38].



RESTRICCIÓN DEL PASO DE ESCORIA	
MEZCLADO / HOMOGENEIZACIÓN	INYECCIÓN DE GASES: Tapon Poroso, Lanza ELECTROMAGNETICO: Bobina
CARGA DE SÓLIDOS	Elementos Aleantes, Gas, Polvos/Gas, Alambre, Gas
TRATAMIENTO AL VACÍO	Desgasificado de Olla, RH/DH, VOD
RECALENTAMIENTO	Horno Olla, VAD
PROTECCIÓN DEL CHORRO DE LA OLLA AL DISTRIBUIDOR	Gas
AGITACIÓN ELECTROMAGNETICA EN COLUMNA CONTINUA	MS, EMBR, SSTFS

Figura 2.2 Clasificación esquemática de los diferentes equipos utilizados en el proceso de refinación secundaria de acuerdo a su operación ^[38].

2.2.2 Operaciones Principales en la Olla de Refinación

Durante el proceso de refinación secundaria se llevan a cabo una serie de operaciones metalúrgicas como: adición de ferroaleaciones, un control en la composición, reacciones cinéticas, eliminación de inclusiones y la modificación de la morfología de estas. Por ello, las funciones principales en dichas operaciones son:

1. Control de gases (oxígeno, hidrogeno y nitrógeno)
2. Reducción del número de inclusiones no-metálicas.
3. Modificación de la morfología de las inclusiones, ya que no pueden ser eliminadas completamente, estas se modifican en tamaño y forma para hacerlas compatibles con las propiedades mecánicas del acero final.
4. Desulfuración, Desoxidación y descarburación.
5. Control y homogenización de la composición química final.



6. Homogenización del baño y el control de la temperatura de vaciado.

En los procesos siderúrgicos, se ha encontrado que es difícil llevar a cabo ciertos aspectos de la refinación en condiciones oxidantes en hornos eléctricos. Por ejemplo, la desulfuración es más factible en condiciones reductoras o cuando el contenido de oxígeno en el acero es muy bajo.

El proceso en la olla permite efectuar la refinación con recalentamiento de acero mediante el arco eléctrico. Además, es posible inyectar un gas inerte como el argón para provocar la agitación del baño, también es un método eficiente para la adición de ferroaleaciones y fundentes, así como el control de la composición final y la eliminación de inclusiones no metálicas.

Además de lograr las funciones señaladas anteriormente, en algunos casos las ollas se pueden conectar a un sistema de vacío, para realizar la descarbonación al vacío para la producción de aceros inoxidable de bajo carbono u otros grados de acero y aleaciones especiales.

2.3 Metalurgia en la Olla de Colada Continua

Dentro del tratamiento que se le da al baño líquido de acero en la olla también, se efectúan con frecuencia cambios físicos y químicos como:

- Desulfuración, por inyección de cal (CaC_2), o magnesio (Mg).
- Desfosforación.
- Desoxidación, por Silicio o Aluminio (Si, Al).
- Desgasificación, usando vacío o purga de gases.
- Coalescencia de partículas de inclusión.

Una descripción un poco más detallada de cada uno de los procesos anteriores es la siguiente:

2.3.1 Desfosforación

Una reacción importante que tiene lugar en el EAF es la de desfosforación. En este caso el fósforo en el metal fundido se oxida formando P_2O_5 , como muestra la siguiente reacción:





Este óxido es atrapado por el CaO presente en la escoria presumiblemente formando $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$. La reacción de desfosforación se favorece con un alto contenido de O en el acero (desplazamiento de la reacción (1) hacia la derecha), una escoria básica (alto contenido de CaO) y una temperatura relativamente baja.

2.3.2 Desoxidación

Este es el tratamiento más importante realizado al acero. El objetivo es disminuir el contenido de 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.

En general, el agente desoxidante suele agregarse durante el sangrado del horno (transferencia del EAF a la cuchara), para así aprovechar la alta turbulencia de esta etapa, que favorece la mezcla entre el acero y el material agregado. A medida que avanza el proceso suelen realizarse agregados del agente desoxidante para ajustar la composición y controlar el contenido de Oxígeno disuelto en el acero.

La desoxidación se logra agregando un elemento con alta afinidad por el oxígeno. Esto significa que la variación de energía libre de la reacción de oxidación de este elemento tiene que ser menor que la de la reacción de oxidación del Fe. Asimismo, 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 O en el baño (desoxidación profunda) con buen rendimiento industrial. En este caso la reacción de desoxidación puede plantearse:



2.3.3 Decarburación

El C, es eliminado por la formación de gases. La reacción de decarburación es favorecida inyectando O_2 en el horno mediante una lanza. Como muestran las reacciones (3) y (4), el C forma CO y CO_2 lo que provoca un burbujeo del metal líquido, fomentando las reacciones metal-escoria.





2.3.4 Desulfuración

El S tiene un aspecto muy negativo en las propiedades de los productos de acero. Durante la solidificación el S puede conminarse con el Fe dando lugar a la formación de FeS:



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.

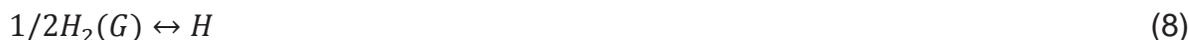
Este problema se soluciona agregando Mn al acero, de manera que al solidificar, el S precipite como MnS. Estas inclusiones tienen un mayor punto de fusión que el FeS por lo que se encuentran sólidas durante la laminación.

2.3.5 Desgasificación

La desgasificación está gobernada principalmente por las siguientes reacciones:



$$K_N = \frac{\%N}{\sqrt{P_{N_2}}} \quad (7)$$



$$K_H = \frac{\%H}{\sqrt{P_{H_2}}} \quad (9)$$

Se puede ver en (7) y (9) que, para lograr la eliminación de los gases disueltos en el acero, es necesaria una baja presión parcial del gas. Cuanto menor 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.



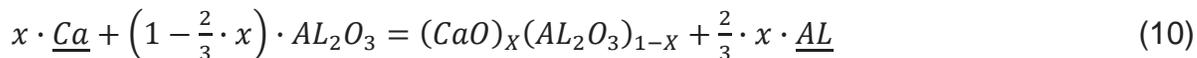


2.3.6 Tratamiento con Calcio

Como ya se ha mencionado, las inclusiones sólidas o semisólidas son perjudiciales en las máquinas de colada continua porque pueden provocar el taponamiento de las buzas. Esto se puede evitar si las inclusiones están líquidas a la temperatura de colada. Una manera de lograr este efecto en el caso de los aceros calmados al Al es modificando la composición química de las inclusiones mediante el agregado de calcio. A medida que se incorpora CaO a las inclusiones de Al_2O_3 la temperatura de fusión decrece, llegando a un punto para el cual las inclusiones son completamente líquidas a la temperatura de colada (aprox. 1600°C).

El tratamiento con calcio es normalmente el último proceso de la metalurgia secundaria. Para agregar el Ca 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, CaFe, etc.) el CaSi es el más comúnmente usado por su relación costo-rendimiento.

A medida que el tubo ingresa en el acero, el Ca se evapora debido a su alta presión de vapor, parte de este vapor se disuelve en el acero, y este Ca disuelto es el que modifica las inclusiones de alúmina de acuerdo a la reacción:



Cuando la modificación permite obtener inclusiones líquidas, estas tendrán mayor facilidad para coagularse y flotar hacia la superficie.

2.4 Comportamiento del Flujo en la Olla de Acero

Como ya se hizo mención anteriormente, existen una gama de factores involucrados directamente en la calidad final del acero como son: el tipo de la escoria, el control de inclusiones no- metálicas, el control de la temperatura del baño y las Características del flujo durante la operación de refinación secundaria por medio de la inyección de un gas inerte como lo es el argón. Sin embargo, este último, representa uno de los retos más grandes, por ser el resultado de una variedad de fenómenos físicos involucrados durante la operación de agitación de la olla de acero. Durante esta operación de agitación de la olla en forma continua, 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. Además de estas operaciones en la olla metalúrgica una de las funciones básicas de la olla, es el transporte del acero de los hornos de fusión a la zona de vaciado continuo.

2.4.1 Medios de Agitación del Metal Líquido en el Horno Olla

Se pueden emplear varias técnicas de agitación, como puede ser el uso de la inyección de gas Argón por la parte superior a través de lanzas rotatorias o la inyección de gas Argón por medio de un tapón poroso por el fondo como se muestra en la figura 3 y la agitación electromagnética (EMS). El gas realiza el mezclado durante su recorrido hacia la superficie. Promueve las reacciones químicas, maximiza la homogenización de temperatura y composición. Por otra parte a través de la generación de turbulencia puede esta ayudar a la aglomeración de las inclusiones más pequeñas y su flotación hacia la escoria.

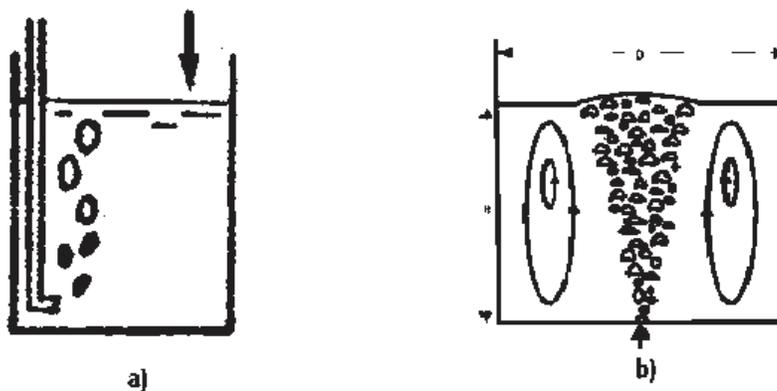


Figura 2.3 Inyección de gas argón a) a través de una lanza y b) a través de un tapón poroso [45].

Inyección de Gas Argón a través de una Lanza

La inyección de gas a través de una lanza sumergida sobre el baño es la forma más simple de inyectarlo, nos promueve una buena eliminación de azufre (S) y fósforo (P), protege el revestimiento del horno olla y requiere poca inversión respecto a los otros métodos. Sin embargo, se tiene una mala eliminación del oxígeno y nitrógeno, la capa superficial se vuelve muy turbulenta y se crean importantes zonas muertas dentro del baño (zona muerta es el área del baño donde la circulación es escasa o nula) [39,40].

Inyección de Gas Argón a través de un Tapón Poroso

La inyección de gas Argón a través de un tapón poroso por la parte inferior de la olla en el baño de acero nos proporciona pocas zonas muertas, una agitación uniforme, un acero limpio, la posibilidad de agitar el horno continuamente en cualquier parte, un efecto de presión ferrostática maximizada, bajos costos de inversión y operación. Sin embargo ocasiona un fuerte desgaste en el material refractario de las paredes, un tipo de construcción muy limitado y riesgos de fracturas ^[39,40].

Los patrones de agitación que se logran en una olla de refinación secundaria, variarán de manera significativa de acorde con la técnica utilizada. Ya que las energías de agitación son función de factores tales como: flujo de gas, diámetro de la tobera, posición, Angulo de entrada del gas y cantidad de metal a agitar (relación diámetro de la olla a altura del metal), entonces el tiempo de mezclado será diferente para cada caso según la configuración que se tenga. Ahora bien existen otra serie de factores que deben ser tomados en cuenta, además del tiempo de mezclado, factores de índole operativa. Uno de esos factores es el área expuesta durante la fase de inyección de gases ya que al incrementarse la energía de agitación, se tienen tiempos de mezclado más cortos, pero también el riesgo de exponer al metal a la acción oxidante del medio ambiente se incrementa.

2.5 Tipos de Tapones Porosos

El tapón poroso es una tobera de material refractario por el cual se puede inyectar un gas dentro de la olla que contiene el acero líquido. Existen dos tipos de tapones porosos: Toberas porosas y Toberas porosas con canales direccionales de flujo, Tapón poroso (dispositivo a través del cual se inyecta gas argón por el fondo del horno olla), (figura 4).

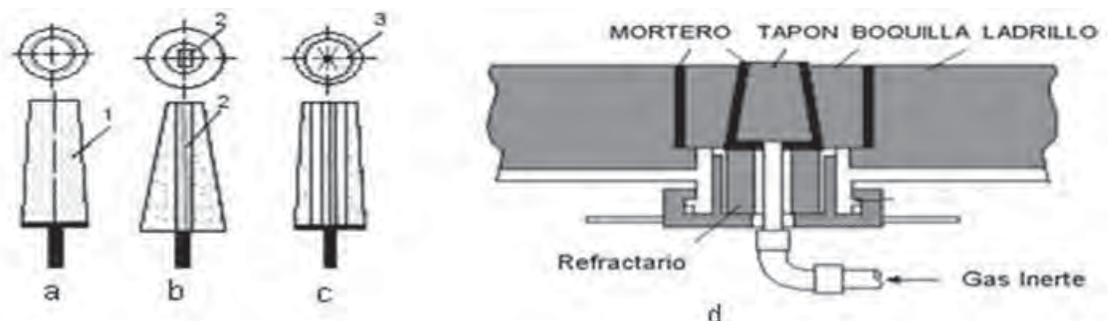


Figura 2.4 Tapones porosos: a) Tobera porosa, b) y C) Toberas porosas con canales direccionales, d) Sección transversal de un tapón poroso instalado ^[41].

2.6 Energía de Agitación



Un factor que tiene que ser muy tomado en cuenta en cualquier sistema de agitación con inyección de gases es un término conocido como energía de agitación o de mezclado la cual está íntimamente relacionada con el tiempo de mezclado. La energía de agitación no es otra cosa que 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 Watts/m³ o en Watts/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**.

$$\epsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1+H}{.48P_0} \right)$$

Donde:

- ϵ = energía de agitación, W-ton -1
- V = velocidad de flujo de gas, N m 3 min -1
- 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.

2.7 Tiempo de Mezclado

El concepto de tiempo de mezclado (energía de agitación ó tiempo requerido para homogeneizar la fase líquida con respecto a la composición química) ha sido ampliamente citado para describir la eficiencia del agitado de la olla por medio de gas ^[42].

El **tiempo de mezcla**, T (ej. el tiempo de agitación para alcanzar una homogeneización del 95%) está dado por:

$$\tau (s) = 116 \epsilon^{-1/3} D^{5/3} H^1$$

Donde D es el diámetro de la cuchara, en m.

2.8 Características del flujo en la olla

El fenómeno de turbulencia en la olla de acero usualmente se presenta en tres etapas principales durante el proceso de operación ^[43, 44].

1. Etapa de agitación y mezclado: mediante la inyección de un gas inerte (argón) en el fondo del baño, ya sea a través de una lanza sumergida o tapones porosos, esto con el propósito de homogeneizar el baño durante la refinación de acero.
2. Etapa de estratificación térmica: se presenta una turbulencia en el baño metálico causada principalmente por el fenómeno de convección natural a través de la pared y

- fondo de la olla, provocando una recirculación vertical de tipo toroidal desde el fondo hacia la superficie del baño.
3. Etapa de drenado del acero; durante el drenado del acero frecuentemente se aprecia la formación de un vórtice a una determinada altura crítica, dependiendo de las condiciones de operación y la geometría de cada olla.

2.8.1 Clasificación del Campo de Flujo en un Baño con Inyección de Gas por el Fondo

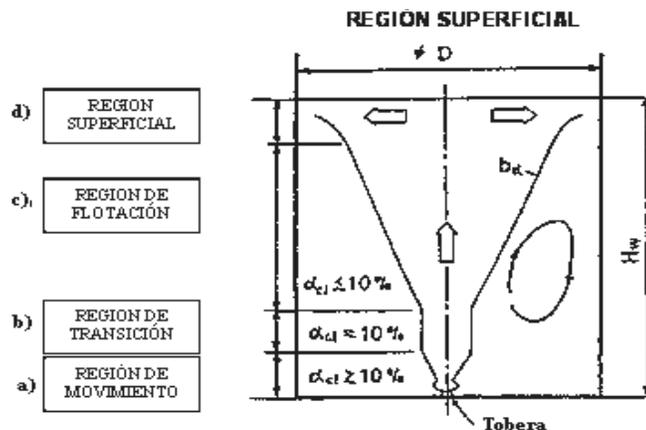


Figura 2.5 Clasificación del Campo de Flujo con Inyección Inferior del Gas en el Horno Olla.

El campo de flujo de un jet de burbujas vertical en un baño puede ser dividido en cuatro regiones con respecto a la distancia axial desde la salida de la tobera como se muestra en la figura 8. Estas son nombradas a) movimiento, b) transición, c) flotación y d) región superficial.

El flujo en la región de movimiento está principalmente gobernado por las fuerzas inerciales del gas inyectado, mientras que las fuerzas de flotación son mayores en la región de flotación tomando el papel principal. La razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación es conocida como el número modificado de Froude. Conforme el número Fr_m es mayor, la región de movimiento aumenta ^[44].

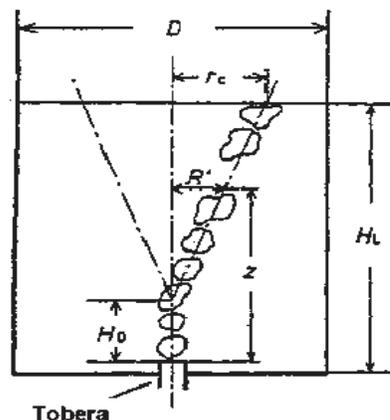


Figura 2.6 Desplazamiento radial del chorro de burbujas ^[45].



Un esquema del desplazamiento radial del chorro de burbujas se muestra en la figura 7. Cerca de la salida del tapón el jet de burbujas está influenciado principalmente por las fuerzas inerciales hasta alcanzar una altura vertical H_0 . Conforme la influencia de las fuerzas inerciales se debilita el jet de burbujas comienza a desplazarse alrededor del eje de la olla. Éste desplazamiento radial se va incrementando conforme el chorro de burbujas se acerca a la superficie. De acuerdo a la propuesta de Ishibashi para calcular la altura de penetración del chorro de gas inyectado horizontalmente, H_0 es correlacionado como una función del número modificado de Froude. Éste representa la relación de las fuerzas inerciales del gas inyectado, y las fuerzas de flotación de las burbujas, de éste modo ^[45]:

$$\frac{H_0}{d_n} = 2Fr_m^{0.25} \quad (6)$$

$$Fr_m = \frac{\rho_g Q_g^2}{\rho_l g d_{ni}^5} \quad (7)$$

Donde ρ_g es la densidad del gas y ρ_l es la densidad del líquido.

El desplazamiento radial del jet de burbujas esta dado por:

$$R' = \frac{(z-H_0)r_c}{(H_L-H_0)} \quad z \geq H_0 \quad (8)$$

$$r_c = 0.37R \quad (9)$$

Donde R es el radio de la Olla.

2.9 Patrones de Dispersión de Burbujas

Existen dos tipos de patrones de dispersión de burbujas en los sistemas agitados con gas por el fondo del horno olla, a) burbujeo y b) jet, como se muestra en la figura 5. La condición crítica entre los dos patrones puede ser descrita por:

$$M = \frac{u_n}{c} = 1 \quad (3)$$

$$u_n = \frac{Q_g}{\pi d_{ni}^2 / 4} \quad (4)$$



Donde M es el número de Mach a la salida del tapón, u_n es la velocidad del gas a la salida del tapón, c es la velocidad del sonido, Q_g es el flujo volumétrico del gas y d_{ni} es el diámetro interior del tapón.

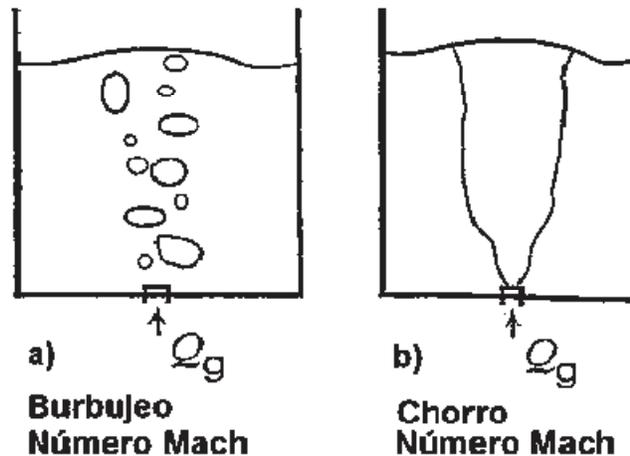


Figura 2.7 a) Burbujeo y b) Chorro ^[45].

El chorro es controlado principalmente por las fuerzas inerciales del gas, formando una columna de gas en el baño. Muchas burbujas pequeñas son formadas en la interface gas líquido y el baño líquido es forzado a moverse debido a las fuerzas cortantes en la interface. Bajo las condiciones de burbujeo, las burbujas son generadas sucesivamente a la salida del tapón, y el flujo líquido es afectado por las fuerzas inerciales del gas inyectado, así como por las fuerzas de flotación que actúan sobre las burbujas en el baño ^[46].

Debido a la complejidad de los movimientos cinéticos presentes en la olla (mecánicos, térmicos o naturales), la turbulencia es difícil de definir para este tipo de sistemas, a pesar de la información existente sobre el tema; en los capítulos posteriores nos enfocamos a describir detalladamente los fenómenos ocurridos durante la operación del agitado. De acuerdo con algunos autores como Karman, hinze y bradshaw ^[47] en forma general, la turbulencia se clasifica según sus patrones de flujo como son:

1. Movimientos irregulares en un fluido con respecto a una superficie sólida o entre corrientes vecinas del mismo fluido que pasan sobre si.
2. El movimiento de flujo turbulento es una condición irregular del fluido en que las cantidades presentan una variación aleatoria en coordenadas de tiempo y espacio, así que pueden discernirse los distintos valores promedios.



3. Existe un amplio rango de escalas de longitud en el tiempo y espacio, que son representadas por frecuencias y longitudes de onda y son deducidas por un análisis de Fourier para un historial en el tiempo de flujo turbulento.

Esta condición irregular en el flujo con respecto a una pared vertical y tuberías, usualmente ocurre cuando el número de Reynolds es mayor de 1000 a 2100. De hecho, para números de Reynolds mayores a este rango, las fuerzas inerciales superan las viscosas y el movimiento laminar se vuelve inestable reflejando una velocidad rápida, aparición de fluctuaciones en la presión y el movimiento se vuelve inherentemente tridimensional e inestable^[48].

En la actualidad se han investigado los fenómenos de transporte que ocurren durante las operaciones de refinación y agitación de la olla de acero, basándose en su mayoría en la modelación de prototipos a escala, usando agua y aceite como líquidos de referencia. En estos modelos los fenómenos de flujo de fluidos tienen un papel muy importante, de hecho en la mayoría de las operaciones de extracción y refinación de metales, debido a que estos se encuentran comúnmente en estado líquido. Durante los últimos años, se han obtenido grandes avances sobre la química y la termodinámica de las operaciones en los procesamientos de los metales. Sin embargo, el conocimiento de la cinética de refinación no ha progresado tan rápidamente. Quizás, uno de los principales obstáculos, es la escasa información acerca de los fenómenos de flujo de fluidos para estos sistemas.

A pesar de la poca información existente, se aprecia un interés creciente de la aplicación de los conceptos de flujo de fluidos a las operaciones del procesamiento de los metales. En la presente investigación, se pretende comprender principalmente a los procesos de transporte de cantidad de movimiento y masa, por mecanismos de turbulencia, que tienen lugar dentro del sistema durante la operación del agitado de ollas de acero líquido.

Estudios anteriores sobre el fenómeno que ocurre durante el agitado de ollas de acero se basan en su mayoría, en el uso de modelos hidráulicos, reportando una diferencia en sus resultados, algunos de ellos en completa contradicción.

La carencia de un consenso acerca de la dinámica de vórtices durante las operaciones del agitado, se debe a que en realidad es un fenómeno muy dependiente de las características geométricas de cada olla y a las condiciones de operaciones específicas de cada planta. En muchos sentidos el problema general es similar al del flujo de acero en distribuidores, el cual conserva características esencialmente particulares de cada distribuidor. Así podríamos





pensar que el análisis de la dinámica del agitado debe observar características particulares a cada olla.

2.10 Técnicas Utilizadas en el Análisis de Flujo de Fluidos

Con la finalidad de caracterizar el flujo turbulento en la olla fue necesario el uso de técnicas experimentales modernas ya conocidas en la simulación de procesos industriales. El presente trabajo de investigación se realizara mediante simulación matemática, bajo los criterios en estado isotérmico ^[49], con apoyo de datos experimentales de un modelo físico de la olla de las mismas dimensiones ^[46].

2.10.1 Técnica Colorimétrica

La técnica consiste en estimular al sistema mediante una perturbación y analizar la respuesta a este estímulo. La perturbación del medio se realiza con la inyección de un elemento trazador (tinte rojo) compuesto por una solución acuosa con una concentración de 34 g/l.

2.10.2 Técnicas de Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV)

La Velocimetría de imagen de partícula (PIV, sus siglas en inglés) es una técnica de láser pulsátil doble que se usa para medir la distribución de velocidad instantánea en un plano de flujo cuando se determina fotográficamente el desplazamiento de las partículas en el plano durante un intervalo muy breve.

Un sistema PIV se puede visualizar como una cámara que puede tomar una instantánea de la distribución de velocidad en cualquier plano deseado del flujo. La visualización común del flujo proporciona un cuadro cualitativo de los detalles de flujo. La PIV también ofrece una descripción cuantitativa precisa de varias cantidades de flujo como el campo de velocidad, y por lo tanto la capacidad para analizar numéricamente el flujo con el uso de los datos de velocidad obtenidos. Debido a la capacidad de campo completo, la PIV también se usa para validar paquetes computacionales de dinámica de fluidos CFD.

2.10.3 Técnicas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD)

2.10.3.1 Simulación Matemática





La simulación matemática con modelos computacionales es una herramienta poderosa que permite simular el proceso de manera virtual a través de paquetes computacionales, pero con condiciones reales del proceso, lo que presenta gran ventaja sobre la modelación física. La simulación matemática es una técnica muy utilizada, ya que a través de ella se puede obtener gran información relacionada con el proceso, permite predecir entender y reproducir los fenómenos asociados con este, todo esto es debido al gran desarrollo de los métodos numéricos y modelos de turbulencia [8]. La simulación matemática proveerá guías para el diseño experimental [9] y requerirá de la modelación física para su validación, debido a que los resultados de la simulación matemática serán altamente dependientes de las suposiciones echas y de las condiciones frontera preestablecidas, por lo que no deberá de omitirse la modelación física [50]. La técnica empleada para el análisis será la de CFD [13-14].

La técnica CFD (Computational Fluid Dynamics) consiste en la solución de un grupo de ecuaciones algebraicas y diferenciales que cuantitativamente representan un proceso o algún aspecto de un proceso. Un modelo matemático podría ser una relación que define el tiempo requerido para agitar una olla que contiene acero. En otros contextos, un modelo matemático puede predecir y reproducir los fenómenos de transporte para situaciones prácticas.

Esta técnica se lleva a cabo mediante el uso de dos paquetes numéricos llamados comercialmente GAMBIT® Y FLUENT®, basados fundamentalmente en la siguiente secuencia computacional [51, 52].

2.10.3.2 Modelo Matemático

El modelo matemático consiste en la solución simultánea de las ecuaciones de continuidad, de transferencia de momentum y de transferencia de energía bajo condiciones de flujo turbulento. Cuando se estudia el comportamiento del trazador en la olla, se agrega la ecuación de conservación de especies. Estas ecuaciones se resuelven con las ecuaciones de energía cinética turbulenta y las ecuaciones de velocidad de disipación de energía cinética turbulenta.

2.10.3.3 Geometría y Mallado

La entrada de la geometría virtual se realiza por medio de una interfaz de usuario estilo CAD, que permite crear una jerarquía de puntos, curvas y superficies para definir la geometría.

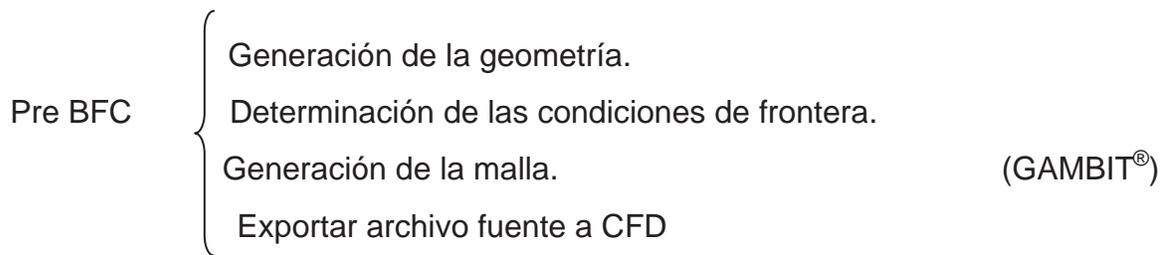




La malla es creada como coordenadas ajustadas al cuerpo (BFC) de una malla curvilínea. También es posible importar la información de la malla de otros sistemas CAD a un pre-procesador de dinámica de fluidos computaciones (CFD) en el cual se introducen las condiciones de operación y las propiedades de fluido.

El procedimiento más común para generar la geometría y mallado del cuerpo consiste en las siguientes etapas, utilizando el preBFC (GAMBIT®).

- Definir la geometría del sistema en términos de puntos en coordenadas cartesianas en 3D.
- Determinar los puntos de la malla sobre las fronteras geométricas del modelo computacional.
- Determinar la localización de todos los puntos interiores de la malla interpolando los puntos de la frontera de la malla.



2.10.3.4 Condiciones de Frontera y Condiciones Iniciales

Las condiciones de frontera y condiciones iniciales supuestas deben ser tal, que representen de la mejor manera posible el caso de estudio, de dichas suposiciones dependerá la convergencia y la confiabilidad de los resultados, ambas condiciones se harán dentro del software comercial Fluent Inc.

2.10.3.5 Elección del Modelo

Este es un paso previo e importante antes de empezar a simular el proceso, ya que consiste de la elección adecuada del modelo a utilizar, de aquí dependerá la pronta o no convergencia, se debe ser cuidadoso en la elección del modelo, se debe tomar en cuenta las características propias del proceso a simular, como son: numero de fases, tipo de flujo, es decir, si es acoplado o desacoplado, si es diluido o denso, si es turbulento o laminar, y si hay o no reacción, etc., cada una de esas respuestas contribuirá a la elección correcta del modelo a utilizar.

Importación de la geometría mallada.

TERMOFLUIDOS



TERMOFLUIDOS



Pre procesamiento Condiciones iniciales o de operación.
Modelos matemáticos. (FLUENT®)
Condiciones límite.
Algoritmo de solución.
Factores de relajación y discretización.

Procesamiento {
 Marcha en el tiempo, ($t=t+\Delta t$)
 Número máximo de iteraciones.

Post procesamiento {
 Desplegar mapas de contornos, turbulencia, etc.
 Gráficos.
 Archivos de datos (OUT).
 Campos vectoriales.

Las ecuaciones diferenciales de momento, continuidad se discretizan mediante el uso de un volumen de control, así como un esquema diferencial para aproximar los términos de convección y difusión, mientras se resuelven los términos de transporte en la ecuación de conservación de masa. El sistema de ecuaciones se calcula con un algoritmo que consiste en resolver simultáneamente una matriz diagonal, seguida por los gradientes de presión y la modificación de la velocidad para satisfacer la ecuación de continuidad.

El código empleado, se desarrollo para una simulación en flujo turbulento tridimensional, aplicado al proceso de la olla de acero con un fluido incomprensible.

2.10.3.6 Fluent®

El software Fluent® es una tecnología computacional que permite estudiar la dinámica de todas las sustancias que fluyen, con este se puede construir un modelo que represente el sistema que se desee estudiar. Es una técnica de análisis sofisticada. Su aplicación es





diversificada ya que no solo predice el comportamiento del fluido, sino también la transferencia de calor, de masa, cambios de fase, reacciones químicas, etc ^[53].

CAPITULO III

3.1 Simulación Matemática

3.1.1 Introducción

Las condiciones de operación tales como alta temperatura, tamaño de las ollas industriales, opacidad visual del flujo de acero fundido, entre otros presentes en las plantas de acero, representan grandes limitantes para llevar a cabo investigaciones experimentales. Consecuentemente, la simulación matemática se ha convertido en una alternativa para investigar la hidrodinámica de los fenómenos de transferencia de masa asociados a las ollas de colada continua.

Un modelo matemático consiste en una serie de ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales las cuales representan cuantitativamente un proceso o algunos aspectos de este ^[54]. Estos modelos, en general, se han convertido en una herramienta muy útil debido a que permiten reproducir procesos en condiciones reales o condiciones simuladas y obtener resultados confiables si se utilizan las condiciones geométricas, frontera, condiciones iniciales, modelos matemáticos y métodos numéricos adecuados. La técnica empleada para el análisis del flujo de fluidos es la de CFD (Computacional Fluid Dynamics) ^[55], la cual logra reproducir satisfactoriamente los fenómenos que ocurren en el laboratorio y en la práctica industrial.

La simulación matemática de la olla de colada continua inicia con el establecimiento de la geometría del sistema, ubicando en un sistema tridimensional, solo el espacio físico ocupado por el fluido dentro de la olla. A continuación esta geometría es segmentada en pequeñas secciones denominadas sub-volúmenes utilizando para tal fin un procesador conocido como Gambit[®] el cual permite dibujar cualquier forma física en un espacio di o tridimensional. La tercera parte es el establecimiento de las condiciones frontera e iniciales en el espacio tridimensional creado, es decir se definen la entrada la o las salidas, posiciones de la pared, la velocidad de la entrada, la superficie libre, la posición de los dispositivos inyectores de gas, etc. También se definen las propiedades del fluido como su densidad, viscosidad y calor específico entre otros. Todo esto se lleva a cabo dentro del software comercial Fluent[®], en el cual se encuentran programados diferentes modelos matemáticos y





métodos numéricos, la cuarta parte es la resolución del problema propuesto mediante la aplicación de los modelos matemáticos y métodos numéricos que resuelven con mayor eficiencia; en términos de reproducibilidad el fenómeno y rapidez de convergencia del sistema.

3.2 Modelo Matemático

Los aspectos físicos de cualquier situación que involucren flujo de fluidos están gobernados por las siguientes ecuaciones básicas:

- conservación de masa
- conservación de momentum
- ecuaciones de turbulencia

Una práctica común en el análisis numérico es transformar estas ecuaciones de su forma diferencial a ecuaciones algebraicas que se resuelven mediante técnicas apropiadas para obtener la distribución de los perfiles de flujo. A la transformación se le conoce como discretización. La técnica utilizada en este trabajo se conoce como volumen de control y consiste en la integración de las ecuaciones diferenciales en cada volumen de control produciendo una ecuación en un esquema de diferencias finitas que conservan cada cantidad en el volumen de control de estudio.

El modelo matemático consiste en la solución simultánea de la ecuación de continuidad, transferencia de momentum y transferencia de energía de agitación bajo condiciones de flujo turbulento. Además cuando es requerida también se agrega la ecuación de conservación de especies. Estas ecuaciones se resuelven con las ecuaciones de energía cinética turbulenta y las ecuaciones de velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta usando el modelo de turbulencia ^[56] $k - \varepsilon$.

3.3 Modelo Euleriano de dos Fases

Este modelo multifásico es el que se uso para realizar las simulaciones del horno olla. En este modelo, se resuelve un campo de velocidad para el acero líquido y otro campo de velocidad para la fase gaseosa. La ecuación de momentum para cada fase es afectada por la otra fase a través del término interfacial de arrastre, se ha empleado este tipo de modelos en varios estudios de flujo multifásico en la colada continua, la turbulencia inducida por las burbujas puede ser adicionada al modelo $K - \varepsilon$ mediante términos fuente.





3.4 Modelo de Turbulencia K-ε

El modelo matemático propuesto por Jones y Launder ^[57] conocido como K-ε, dentro de este modelo existen tres opciones que son K-ε standard, K-ε RNG y K-ε Realizable, los tres modelos tienen forma similar en sus ecuaciones de transporte para K y para ε, la diferencia más marcada es en el método de calcular la viscosidad turbulenta, el modelo K-ε es el modelo matemático más utilizado, esto es debido a que tiene varias ventajas: su concepto es simple, está implementado en varios software comerciales y ha demostrado capacidad para simular correctamente un gran número de procesos industriales entre los cuales están: combustión, flujo de fluidos, flujos multifásicos ^[58]. Sin embargo en el presente trabajo donde existe un flujo rotatorio complejo, los resultados son convincentes con el modelo K-ε Standard para la inyección con tapón poroso, pero no así para la inyección con el dispositivo generador de flujo rotacional. De aquí que se hayan probado los otros dos modelos de turbulencia como son el k-ε RNG y el K-ε Realizable, de los cuales el modelo k-ε REALIZABLE fue el que más se acercó al perfil de flujo de los datos experimentales.

3.5 Ecuaciones Fundamentales

Ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Ecuación de conservación de momentum:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \beta(T_0 - T)\rho_0 g_j$$

El último término corresponde a las fuerzas de flotación.

Para la simulación del flujo turbulento, se usó el modelo $k - \epsilon$ propuesto por Jones y Launder. La viscosidad turbulenta se calcula a través de su relación con la energía cinética (k) y su velocidad de disipación (ϵ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon$$



$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 G_k \frac{\varepsilon}{K} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

Los termino G_k y G_b son la velocidad de producción de energía cinética turbulenta y la generación debido a las fuerzas de flotación, respectivamente.

$$G_k = \mu \left[\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

La viscosidad turbulenta se obtiene suponiendo que es proporcional al producto de una escala de velocidad turbulenta y una escala de longitud, y está dada por:

$$\mu_t = \rho C_m \frac{k^2}{\varepsilon}$$

La viscosidad efectiva del fluido bajo un régimen turbulento está dada por:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

Los valores para $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_h$ fueron obtenidos de Laundre y Spalding ^[59] y son: 1.44, 1.29, 0.09, 1.0, 1.3, y 0.9, respectivamente.

Ecuación de conservación de especies i' .

$$\frac{\partial(\rho m_{i'})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i'}} (\rho v_i m_{i'}) = \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i',i})$$

$$J_{i',i} = -\rho (D_{eff})_{i',m} \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i}$$

3.6 Modelo Virtual de la Olla

Se construyo un modelo virtual de la olla partiendo de los planos del modelo físico el cual fue construido en el proyecto antes mencionado. El primer paso en la modelación consistió en acceder a un programa estilo CAD, donde se creó por medio de puntos, curvas y superficies las dimensiones geométricas correctas del recipiente, como se observa en la figura 3.1 y en la figura 3.2 donde se pueden observar las dimensiones de la olla a escala y también se pueden observara las condiciones límite de la geometría como son presión de entrada en la superficie de la olla, velocidad de entrada a la entrada en el tapón poroso y todo lo demás tiene condición de pared.



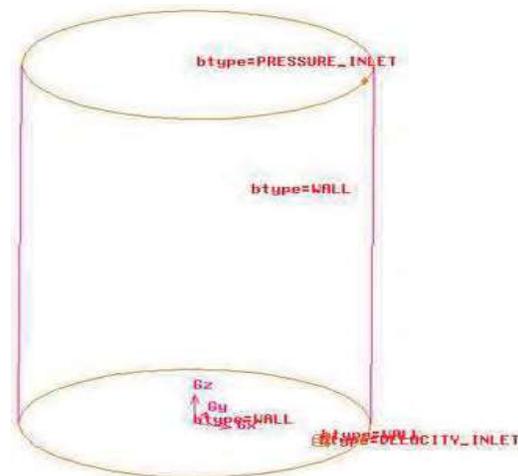


Figura 3.1 modelo de la olla y condiciones de frontera.

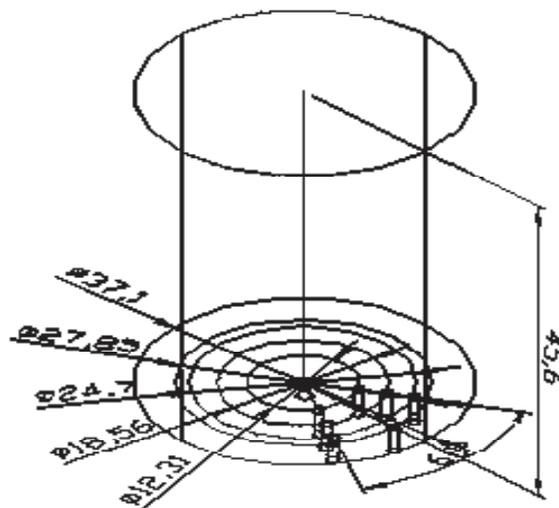


Figura 3.2 Dimensiones de la olla y localización de los medios porosos.

En este caso el modelo virtual se adaptó especialmente para las condiciones de operación manejadas en la planta. El dominio computacional se dividió en una malla estructurada como se aprecia en la figura 3.3, de manera virtual solamente se resuelve el espacio interior ocupado por el fluido contenido en la olla.



Figura 3.3 dominio virtual en 3D generado por CFD con aproximadamente 600,000 celdas.

3.7 Método Numérico

Las ecuaciones de continuidad (transferencia de masa), y de turbulencia y todas las condiciones de frontera se adaptaron a un esquema de diferencias finitas y se resolvieron mediante una técnica numérica conocida como SIMPLE (Semi Implicit Method For pressure Linked Equations) ^[60] método semi-implícito para ecuaciones enlazadas por la presión.

El algoritmo SIMPLE relaciona la velocidad y los campos de presión, los cuales satisfacen las ecuaciones de momentum y continuidad en un punto, como las ecuaciones no se resuelven simultáneamente en todos los puntos, y debido a que las ecuaciones son no lineales y están acopladas se requiere de un procedimiento de solución iterativo con iteraciones continuas hasta satisfacer las ecuaciones en todos los puntos, cada iteración del procedimiento de solución consiste de los siguientes pasos:

- Se resuelven las ecuaciones de momentum usando un campo de presión supuesto.
- Se resuelve la ecuación correctiva de la presión (balance de masa) para obtener las correcciones necesarias al campo de presión. En este punto se hacen también los ajustes correspondientes a las componentes de la velocidad.
- Se resuelven las ecuaciones de flujo turbulento usando el campo de velocidades actualizado, con el fin de obtener la distribución de la viscosidad efectiva.
- Se resuelven las ecuaciones auxiliares, como la de conservación de especies, radiación etc. Utilizando los valores actualizados de las otras variables.
- Se actualizan las propiedades del fluido.

Los pasos anteriores se repiten hasta que el error de cada ecuación de conservación en cada volumen y sobre el dominio global disminuya el valor requerido. El error permisible o criterio de convergencia que adoptamos para nuestro caso es de 1×10^{-4} .

3.8 Procedimiento Iterativo del Método Numérico

El procedimiento utilizado en esta sección (simulación matemática), se lleva a cabo en una estación de trabajo en el laboratorio de simulación matemática del departamento de posgrado en Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana. El procedimiento general para llevar a cabo la etapa de simulación del proceso se describe en la figura 3.3.

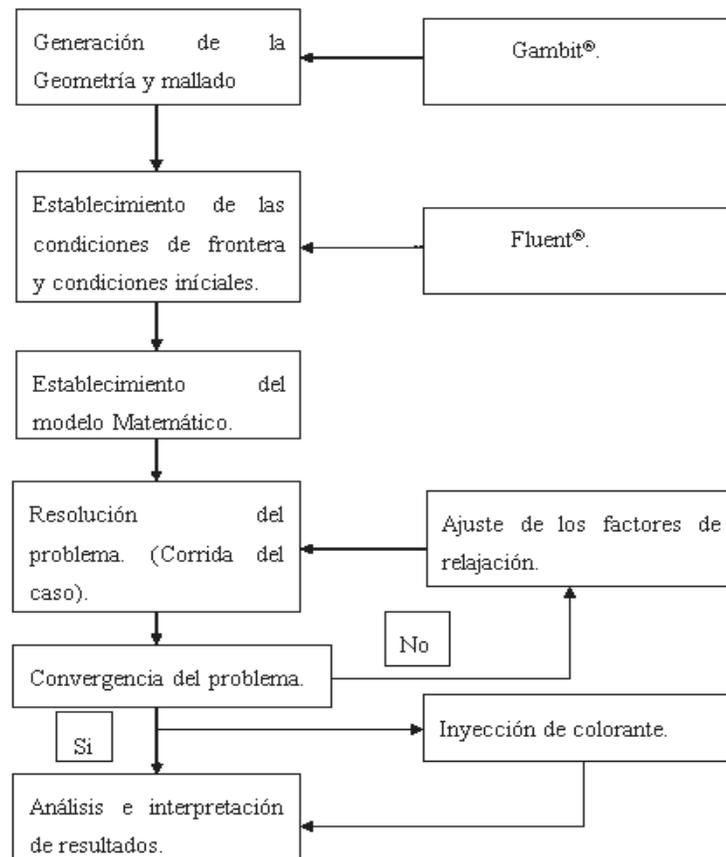


Figura 3.4 diagrama de flujo que se siguió para la realización de las simulaciones.

3.9 Condiciones Iniciales y de Frontera

- Condiciones isotérmicas.
- La olla real y la olla en el modelo se considera que sus radios son constantes.
- El líquido es homogéneo en temperatura.
- Condiciones de no deslizamiento en las paredes.
- Condiciones libres de esfuerzo en la superficie.
- Fluido incompresible.



- Fluido Newtoniano.
- Flujo estacionario y flujo no estacionario.
- Flujo turbulento.
- La presión en la superficie es la presión atmosférica.

CAPITULO IV

4.1 Análisis de Flujo de Fluidos Mediante Simulación Matemática

A continuación se presenta un análisis de los resultados de dinámica de fluidos realizados mediante simulación matemática para la olla de acero durante la etapa de agitado en condiciones isotérmicas.

En el proceso de operación de la olla, a menudo se encuentran involucradas tres fases: el aire atmosférico que circunda el sistema, la escoria, que flota en la superficie del baño, generada a partir de la refinación y que tiene como funciones básicas el proteger al acero de una posible reoxidación y por último el acero. En este estudio no se tomó en cuenta la capa de escoria. Por razones de validación con la experimentación física ya que en esta no se tomo en cuenta la capa de escoria.

En la figura 4.1 se presenta la olla en la modalidad de flujo multifásico, donde se observa la división entre las fases presentes. En la escala, el color rojo representa la fracción de agua, el color amarillo representa la interfaz entre el agua y el aire, el color azul representa el aire de la atmosfera.

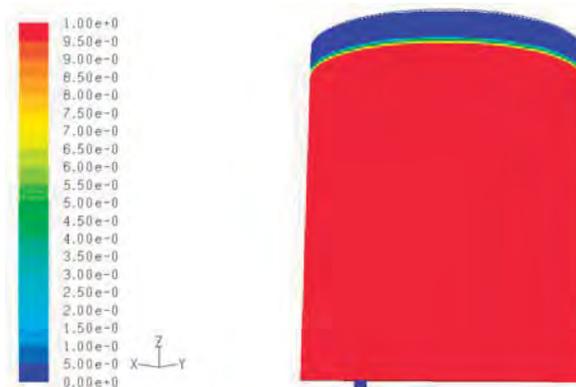


Figura 4.1 Vista isométrica en 3D de la olla, donde se aprecia la fracción de aire cuando la altura en el baño es 456 mm.

4.2 Fluidos de Trabajo



En este estudio se modelara el agua en lugar del acero y el aire en lugar del argón debido a la semejanza entre las viscosidades cinemáticas de estos fluidos respectivamente, y debido a que los resultados que se obtengan de las simulaciones matemáticas se validaran y compararan con los resultados obtenidos en el trabajo de experimentación física que realizo el M.C. Renato Gonzales Bernal graduado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En el experimento físico descrito anteriormente se uso el agua para modelar el acero líquido y el aire para modelar el argón, de esta manera se presentan en la tabla 4.1 las propiedades de los fluidos de trabajo que se usaran para la simulación matemática.

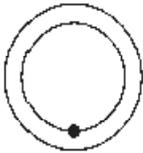
Tabla 4.1 Propiedades del agua, aire, argón y acero.

PROPIEDADES	ACERO A 1600°C	AGUA A 20°C	AIRE A 20°C	ARGÓN A 20°C
DENSIDAD (ρ)	7000 Kg/m ³	1000 Kg/m ³	1.29 Kg/m ³	1.60 Kg/m ³
VISCOSIDAD (μ)	0.062 g/cm·s	0.0089 g/cm·s	1.8x10 ⁻⁶ g/cm·s	2.1x10 ⁻⁶ g/cm·s
VISCOSIDAD CINEMATICA (ν)	0.886 cm ² /s	0.890 cm ² /s	0.146 cm ² /s	0.131 cm ² /s

4.3 Caso que se estudio

El caso que se estudio en este trabajo es el que se muestra en la tabla 4.2, esto debido a que este caso fue el que se estudio en el experimento físico descrito anteriormente, y como los modelos matemáticos requieren de resultados de experimentos físicos para su validación, es por esto que tomamos los resultados que se obtuvieron en el experimento físico para validar nuestro modelo matemático, los resultados que se usaron del experimento físico para validar la simulación matemática son: campo de vectores obtenidos mediante la técnica del PIV, curvas de tiempo de mezclado y videos de ascenso de las burbujas de aire y de inyección de colorante.

Tabla 4.2. Caso que se simulo.

CASO	NÚMERO TAPONES	UBICACIÓN	FLUJO DE GAS POR TAPÓN	UBICACIÓN DE TAPONES
1	1		a) 4.90 lts/min. b) 3.00 lts/min.	Tres cuartos del radio.



4.4 Validación de los Modelos Matemáticos

La validación del modelo matemático es una etapa de suma importancia en la modelación matemática, pues aquí se comprueba si los resultados que arroja la simulación matemática son físicamente realistas. La validación de un modelo matemático consiste en comparar los resultados obtenidos mediante la simulación matemática con resultados obtenidos mediante experimentación física. Si los resultados numéricos concuerdan con los datos experimentales el modelo matemático está validado por dichos experimentos, y esto es lo que se realizara en esta atapa del presente trabajo.

En la tabla 4.3 se muestra el orden que se siguió para llevar a cabo la validación de la simulación matemática, en la cual primero se realizaron simulaciones en dos dimensiones en estado estacionario para darnos una idea sobre qué modelo multifásico de fluido nos podría dar los mejores resultados o mejor dicho la mejor aproximación a lo que sucede en la realidad esto para la primera fase de las simulaciones, para la segunda fase se realizaron simulaciones en tres dimensiones ya que en esta fase del proceso de validación ya sabemos de los resultados de la simulación matemática en dos dimensiones que el mejor modelo multifásico de fluido para validar nuestro modelo matemático es el modelo Euleriano, entonces el siguiente paso a seguir es saber qué modelo de turbulencia y qué modelo de discretización de ecuaciones son los que mejor representan el campo de flujo que se obtuvo mediante la experimentación física.

Tabla 4.3 caso simulado para validación.





CASOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CON LA EXPERIMENTACIÓN FÍSICA				
2D				
	MODELO MULTIFASICO DE FLUIDO	MODELOS DE TURBULENCIA	ESTACIONARIO O NO ESTACIONARIO	MODELO DE DISCRETIZACIÓN DE ECUACIONES
PRIMERA FASE	VOF	SKE	NO ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
	EULERIANO	SKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
		RNGKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
		RKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
3D				
SEGUNDA FASE	EULERIANO	SKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
				SEGUNDO ORDEN
				TERCER ORDEN
				QUICK
				POWER LAW
TERCERA FASE	EULERIANO	RNGKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
				SEGUNDO ORDEN
				TERCER ORDEN
				QUICK
				POWER LAW
CUARTA FASE	EULERIANO	RKE	ESTACIONARIO	PRIMER ORDEN
				SEGUNDO ORDEN
				TERCER ORDEN
				QUICK
				POWER LAW
QUINTA FASE	EULERIANO	SKE	NO ESTACIONARIO	QUICK

4.5 Comparación de los Resultados Experimentales con los Resultados del Modelo Matemático

En las siguientes figuras se puede observar la comparación de planos centrales de vectores de velocidad obtenidos con experimentos físicos contra resultados obtenidos con la modelación matemática.



Figura 4.2 plano central de inyección de la olla.

Todos los planos que se mostraran a continuación corresponden al plano de inyección del caso que se presento en la tabla 4.3, con un flujo de gas inyectado de 4.9 litros por minuto y el tapón poroso se encuentra a tres cuartos del radio en el fondo de la olla, la inyección se realiza con el dispositivo conocido como tapón poroso.



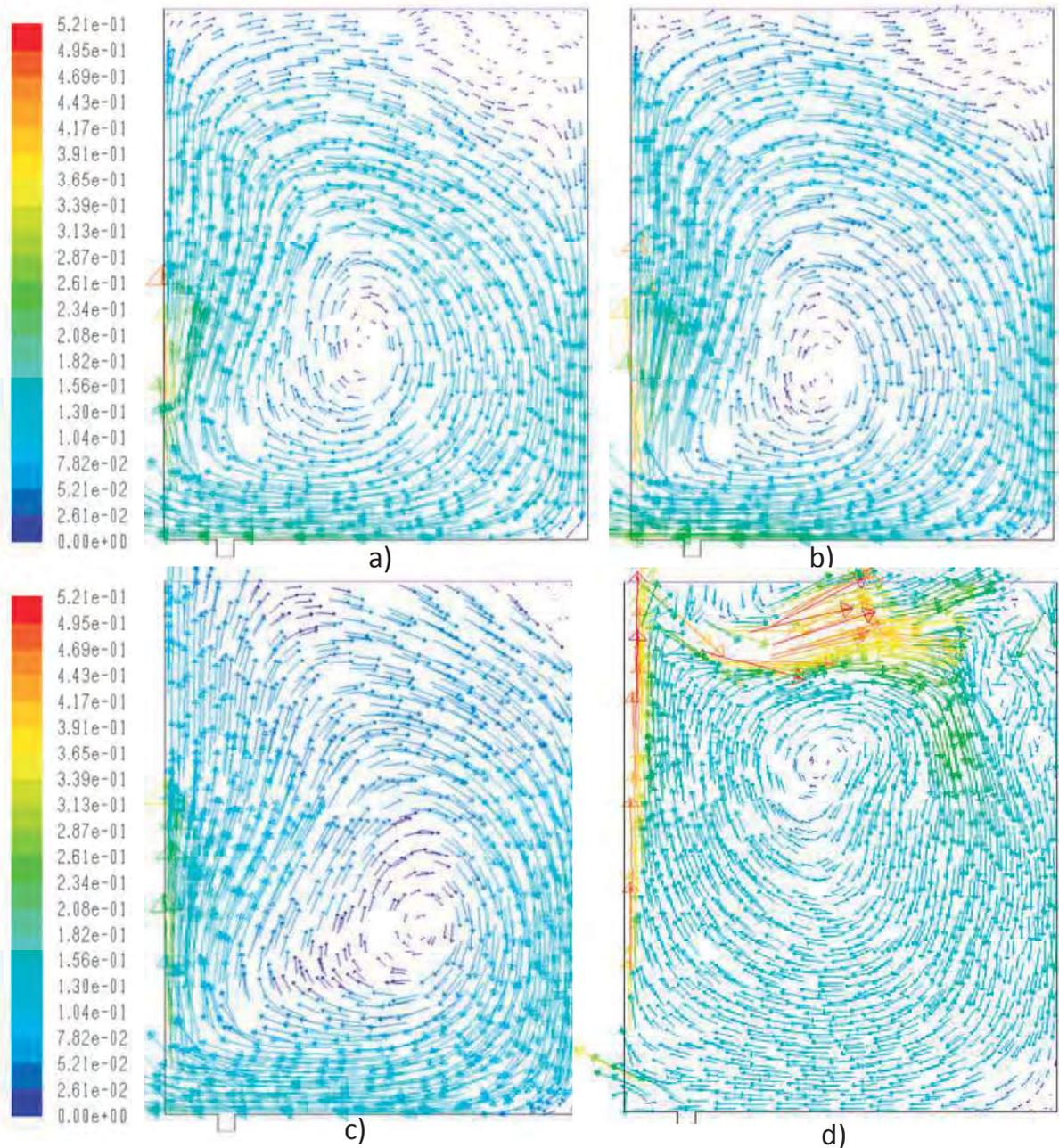


Figura 4.3 plano de vectores obtenidos mediante simulación matemática en 2D, para dos fases, modelo de turbulencia K- ϵ y sus variantes, a) k- ϵ estándar y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario b) k- ϵ rng y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario c) k- ϵ realizable y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario d) k- ϵ estándar y modelo multifásico VOF, estado no estacionario a un tiempo de 5 segundos.

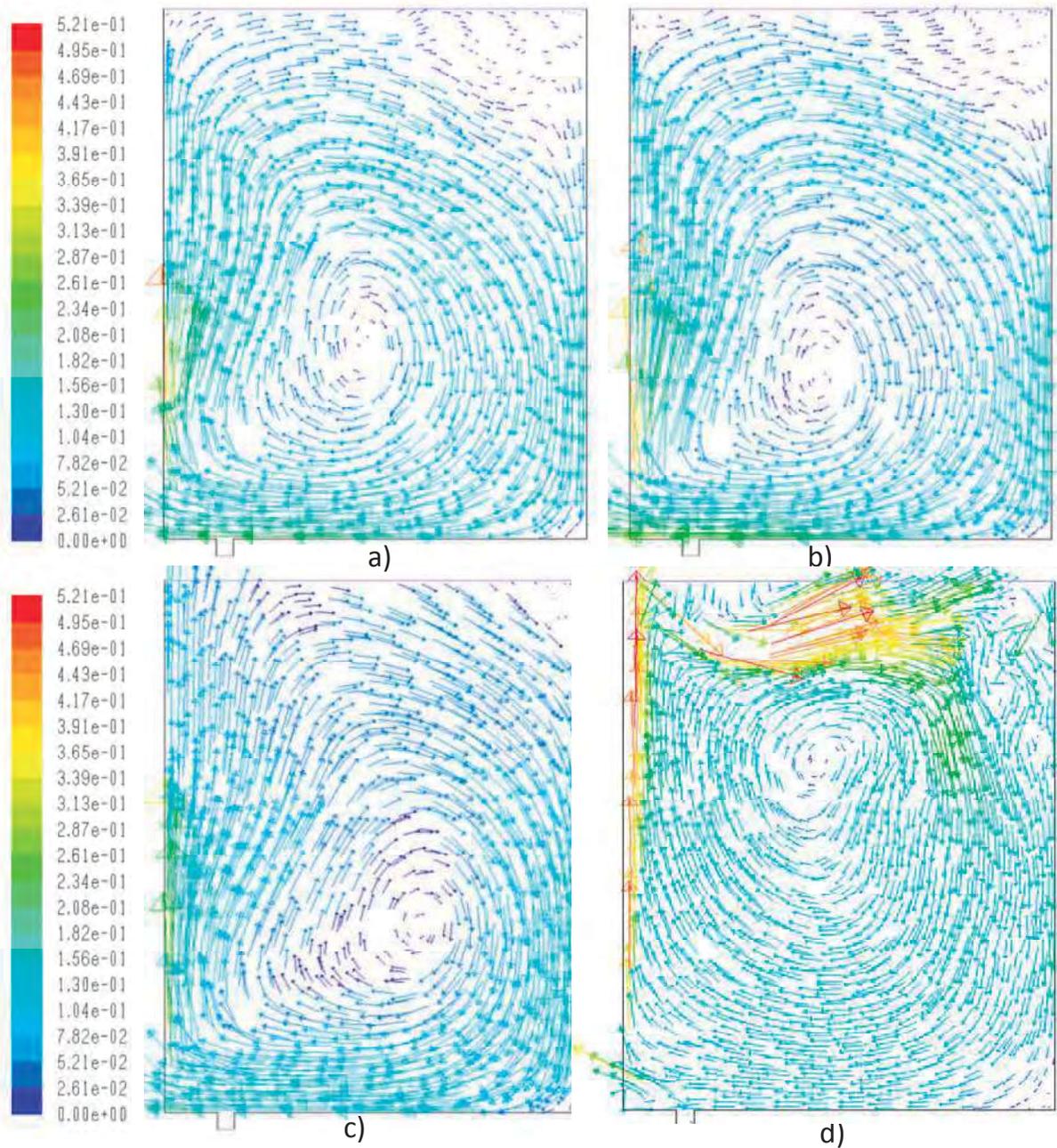


Figura 4.3 plano de vectores obtenidos mediante simulación matemática en 2D, para dos fases, modelo de turbulencia K- ϵ y sus variantes, a) k- ϵ estándar y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario b) k- ϵ rng y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario c) k- ϵ realizable y modelo multifásico Euleriano, estado estacionario d) k- ϵ estándar y modelo multifásico VOF, estado no estacionario a un tiempo de 5 segundos.



Figura 4.4. Patrón de flujo del caso estudiado con un flujo de aire de 4.9 lts/min a) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por PIV.

Figura 4.5 a) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico VOF y con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar, estado no estacionario a un tiempo de 5 segundos b) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico Euleriano y con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar, estado estacionario c) fotografía a un tiempo de 10 segundos después de haber inyectado colorante en el experimento físico.





En la figura 4.3 donde se muestran los campos de velocidades en el plano central de inyección en dos dimensiones, se observa que los casos simulados con el modelo multifásico Euleriano representan de una mejor manera el comportamiento real del fluido, a diferencia del modelo multifásico VOF donde los resultados tienen una mayor discrepancia con el comportamiento real del fluido como se observa en la figura 4.4 donde se presenta el patrón de flujo que se obtuvo con el experimento físico. En la figura 4.5 se observa con mayor claridad que con el modelo multifásico Euleriano el perfil de fases es más semejante a la figura de la experimentación física marcada con el inciso c), que es una fotografía a 10 segundos después de haber inyectado un trazador. En esta fotografía el trazador no es la fase aire, pero en cierta forma representa esta fase ya que la trayectoria del trazador está definida por la fase que transmite la cantidad de movimiento que en este caso es el aire. De las variantes del modelo de turbulencia k-épsilon se observa que los tres presentan perfiles de velocidad de muy parecidos.

En la siguiente figura se comparan mas a detalle los perfiles de velocidad en el plano central de inyección entre la simulación matemática en dos dimensiones con el modelo multifásico Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar y los perfiles de velocidad obtenidos con la técnica del PIV en la experimentación física. En estas dos figuras se puede observar claramente las similitudes entre los dos modelos, tanto en el experimental como en el matemático, lo primero que salta a la vista al observar las dos figuras es el vórtice que se forma en el centro de la olla, el cual está marcado con el número cinco, la otra parte que tiene similitud entre las figuras son las zonas de alta velocidad y son las que están marcadas con los números del uno al cuatro, estas magnitudes de velocidad se identifican como mayores que en el resto de la olla por la magnitud de los vectores y por la escala de colores de velocidad que aparece a la izquierda de la figura.



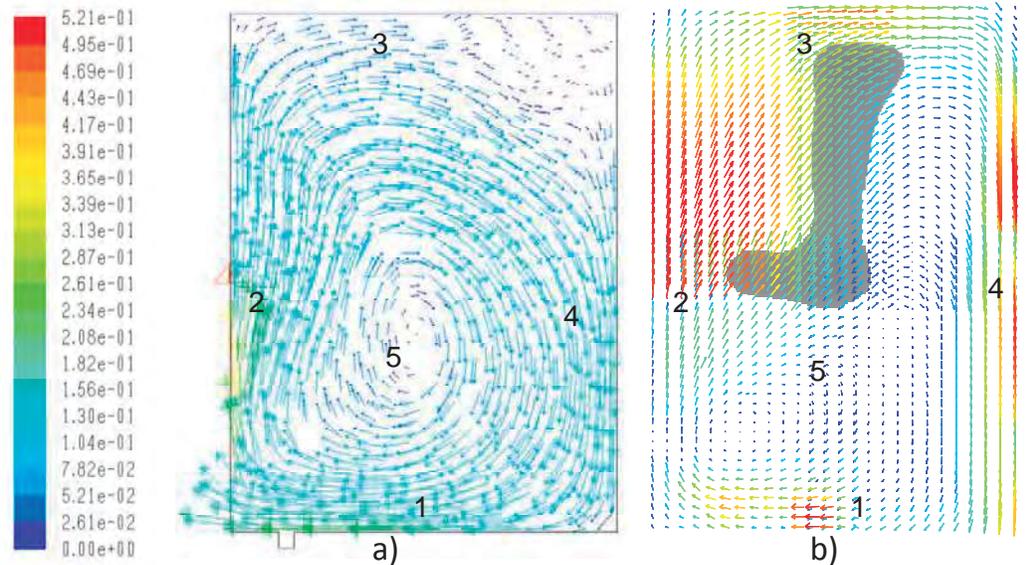


Figura 4.6 vectores de velocidad en el plano central de inyección a) simulación matemática en dos dimensiones en estado estacionario con el modelo multifásico Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar y b) obtenidos con la técnica PIV en la experimentación física.

Al simular ahora en tres dimensiones con el modelo multifásico Euleriano, modelo de turbulencia k-épsilon en sus tres modalidades y con los diferentes modelos de discretización de ecuaciones, se observa en la figura 4.7 que los vectores de velocidad en el plano central de inyección obtenidos con el modelo de turbulencia k-épsilon estándar con tres modelos de discretización de ecuaciones (segundo orden, quick y power law), son muy semejantes a los resultados obtenidos en la experimentación física, no así con los modelos de discretización de primero y tercer orden, y para la simulación con el modelo de turbulencia k-épsilon RNG los modelos de discretización de ecuaciones que más se ajustan al experimento físico son quick y power law (ver figura 4.8). La simulación con el modelo de turbulencia k-épsilon realizable no se alcanzó el criterio de convergencia deseado con el modelo de discretización de ecuaciones de segundo orden y con los otros cuatro modelos no existen grandes diferencias entre los perfiles de velocidad obtenidos con cada uno de ellos, además de que los perfiles de velocidad tienen cierta semejanza con los resultados del experimento físico (ver figura 4.9).

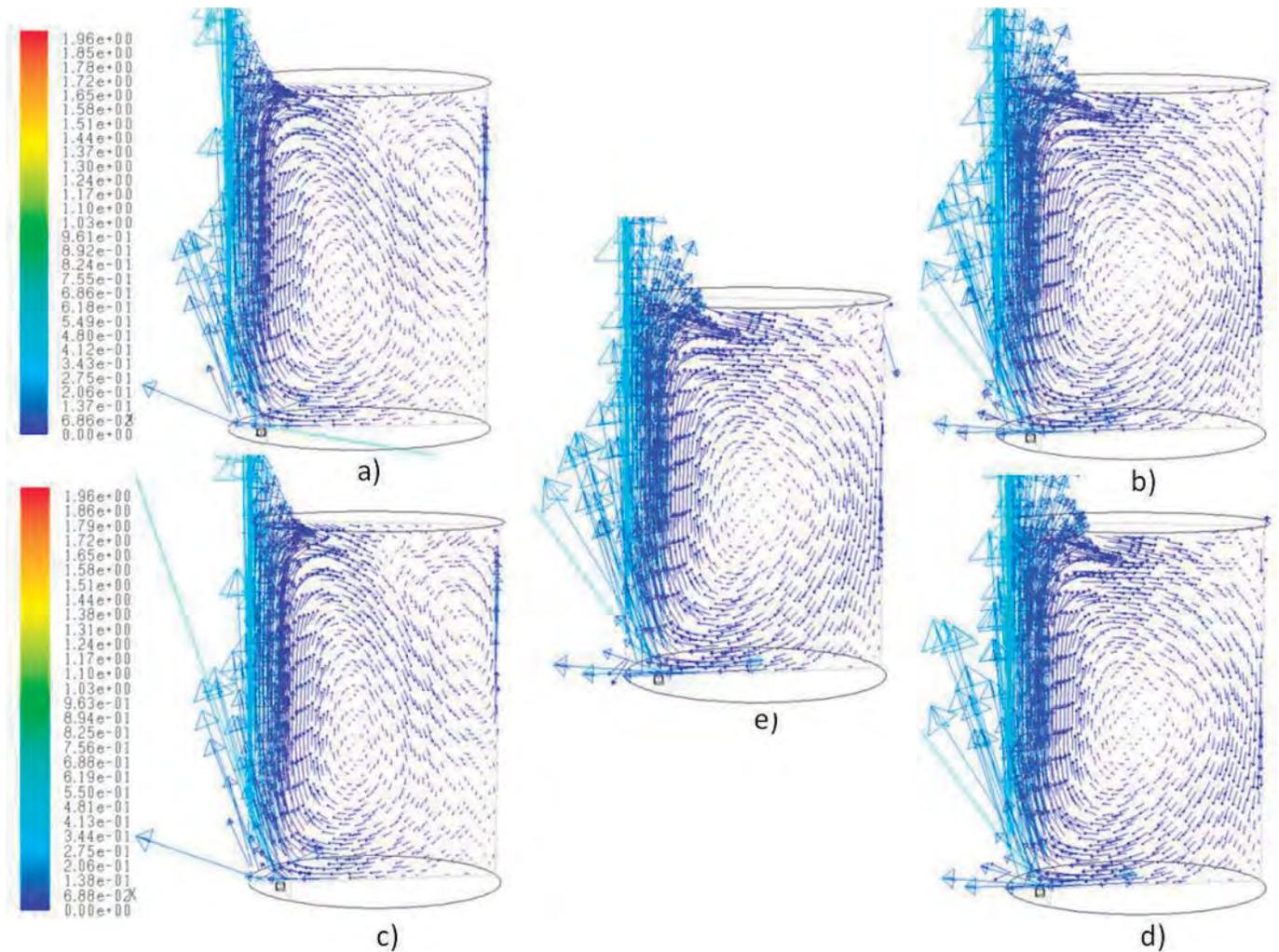


Figura 4.7 plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K-épsilon estándar en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) segundo orden, c) tercer orden, d) quick y e) power law.

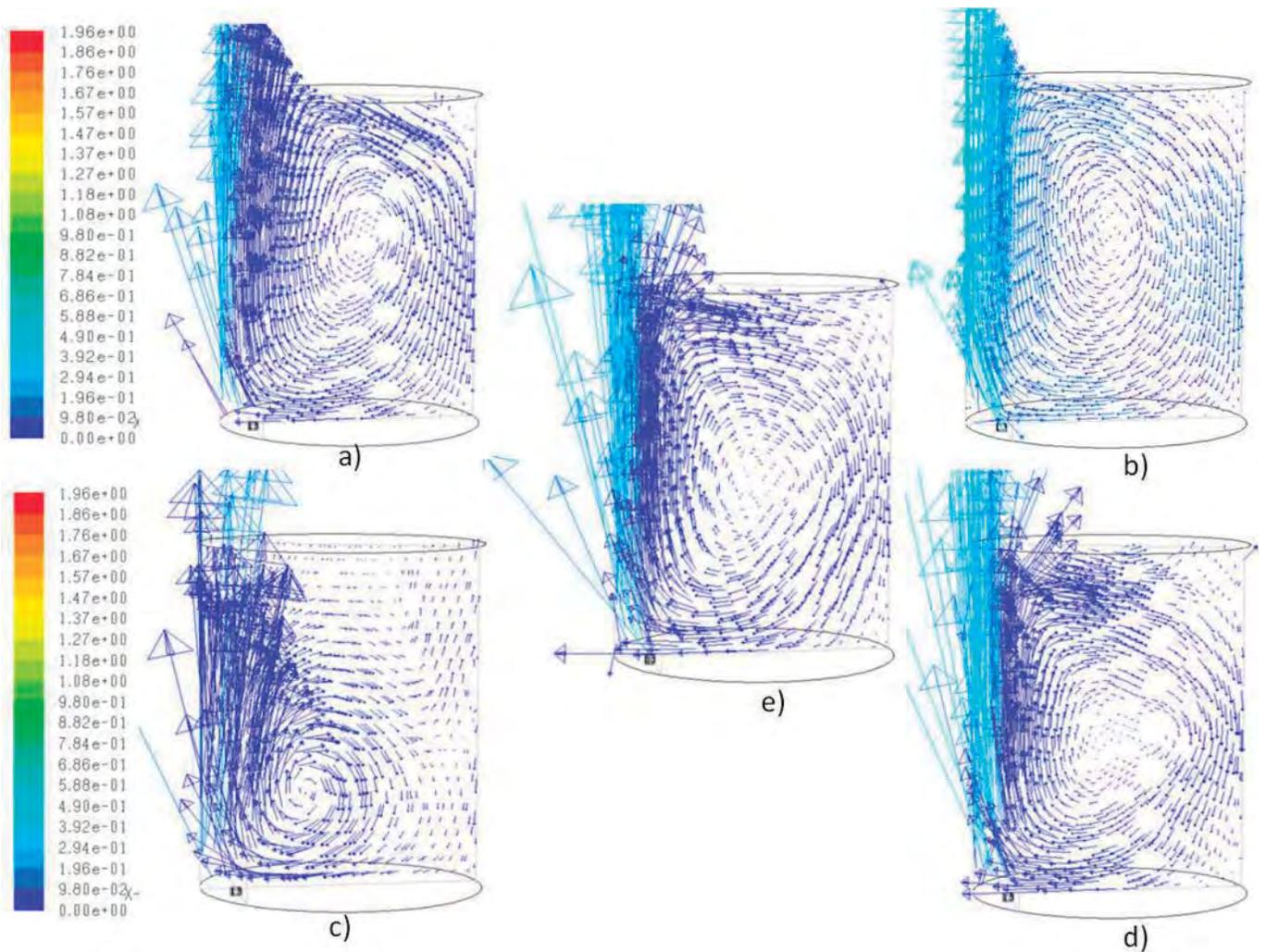


Figura 4.8 plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K- ϵ rng en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) segundo orden, c) tercer orden, d) quick y e) power law.

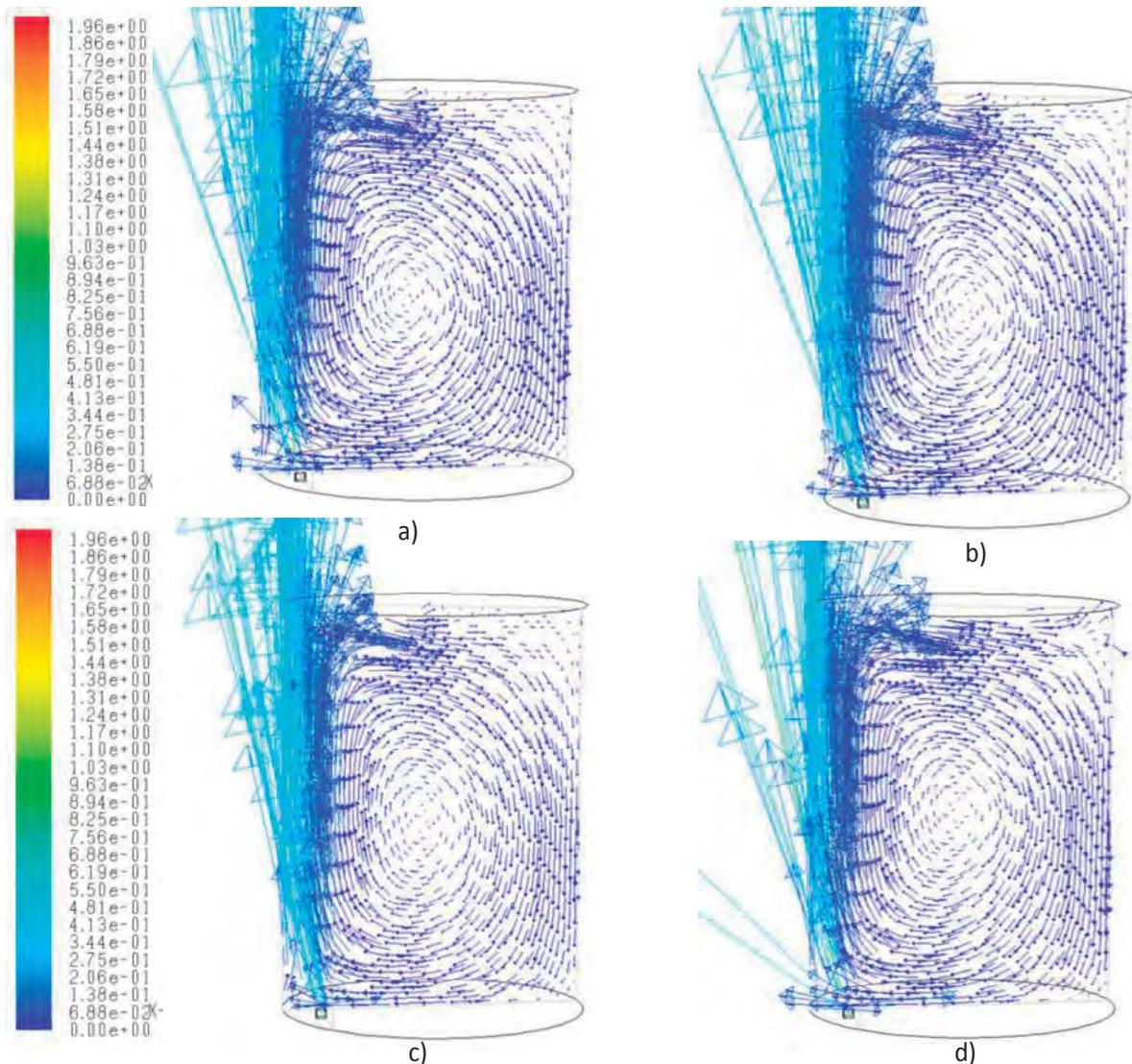


Figura 4.9 plano de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en 3D, aplicando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia K-épsilon realizable en estado estacionario con diferentes modelos de discretización de ecuaciones a) primer orden, b) power law, c) tercer orden y d) quick.

De todos los casos anteriores el modelo de turbulencia k-épsilon estándar es el que converge más fácilmente, y al validarlo con la experimentación física más a detalle se observa que el modelo de discretización de ecuaciones quick es el que muestra perfiles de velocidad mas semejantes a la experimentación física como se puede observar en la figura 4.10

se puede ver en la figura 4.10 que hay una gran similitud entre las dos figuras, lo que más resalta es el vórtice que se forma en el centro de los dos recipientes que está marcado con el número cinco, este vórtice tiene tendencia de cargarse a la izquierda a la zona donde se lleva a cabo la inyección, la otra parte de similitud son las zonas donde la magnitud de la velocidad es mayor que en las otras zonas del recipiente y estas zonas de mayor magnitud de la velocidad son las zonas que están marcadas con los números del uno al cuatro, estas se identifican como zonas de mayor magnitud de velocidad por la magnitud de los vectores en estas zonas además por la escala de colores que se encuentra a la izquierda donde podemos relacionar la magnitud de la velocidad con el color de los vectores, en general se concluye que se tiene una buena representación del experimento físico con la simulación matemática por la semejanza entre las dos figuras.

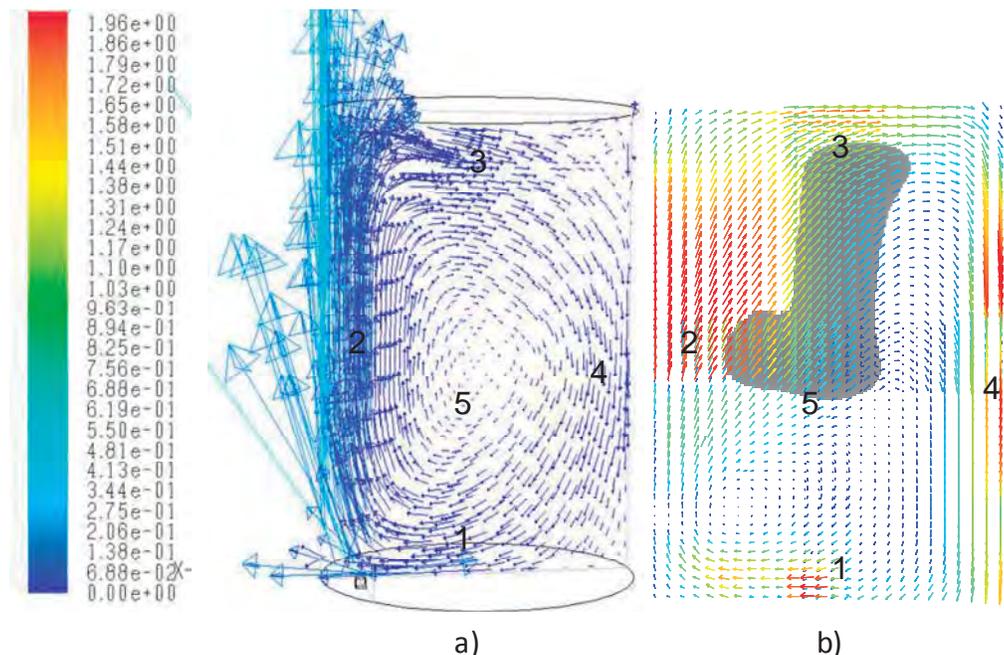


Figura 4.10 a) simulación matemática en estado estacionario usando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia k - ϵ estándar con el modelo de discretización de ecuaciones quick, b) experimentación física.

Para estado no estacionario la simulación matemática se realizó bajo las mismas condiciones que para el caso estacionario y se simuló hasta un tiempo de 60 segundos. Al realizar un análisis entre las figuras a y c figura obtenida con el modelo matemático en estado no estacionario y figura obtenida con el experimento físico respectivamente se pueden ver

claramente las similitudes que existen entre estas dos figuras, la principal similitud es el vórtice que se forma en la zona de inyección del gas y que es muy similar en la forma y en el lugar en que se encuentran estos, los vórtices están marcados con el número cinco dentro de estas dos figuras la otra parte que es muy semejante entre las dos figuras son las zonas de alta velocidad de fluido y estas zonas están marcadas con los numero del uno al cuatro, estas similitudes se dan entre el experimento físico y el caso seleccionado de la simulación matemática pero esto sucede en el caso de la simulación matemática a un corto tiempo de convergencia pero cuando el tiempo de convergencia es mayor en la simulación matemática estas similitudes se van desapareciendo esto lo podemos observar al analizar las figuras b y c figura obtenida mediante simulación matemática y figura obtenida con experimentación física respectivamente, esto se debe a que los perfiles de velocidad obtenidos con el PIV son perfiles de velocidad promediados en un diferencial de tiempo y no son instantáneos por lo tanto en el resultado que arroja el PIV después del procesamiento no se pueden ver ciertas características del flujo. En la experimentación física se analizaron dos minutos tomándose imágenes cada dos segundos por lo tanto de las sesenta imágenes resultantes se obtuvo un promedio de las velocidades que es lo que se presenta, y en la simulación matemática el diferencial de tiempo fue de 1×10^{-4} segundos por lo tanto en la simulación matemática se pueden observar ciertos cambios de flujo que en el experimental no se pueden ver, ver figura 4.11.

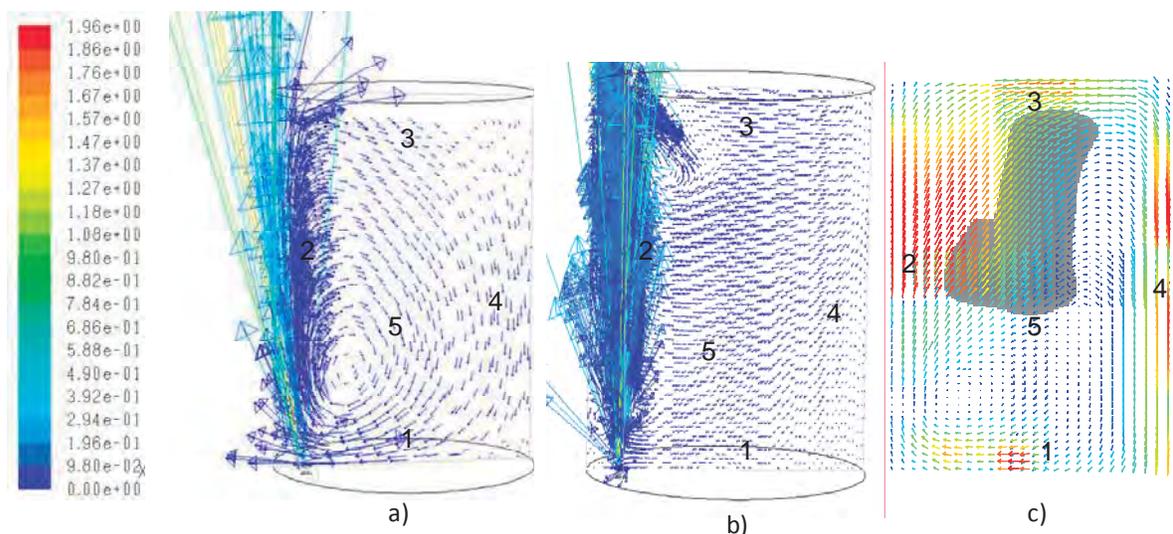


Figura 4.11 a) y b) simulación matemática en estado no estacionario a un tiempo de convergencia de 5 y 60 segundos respectivamente usando el modelo multifásico de fluido Euleriano y el modelo de turbulencia k-épsilon estándar con el modelo de discretización de ecuaciones quick, c) experimentación física.



En la figura 4.12 se presentan fotografías donde se muestra el comportamiento de las burbujas de aire en su recorrido desde el fondo de la olla a llegar a la superficie libre durante la inyección del aire al baño tanto para la simulación física como para la simulación matemática, en estas fotografías se puede observar el ascenso de las burbujas, las fotografías que se muestran de la simulación matemática son a diferentes tiempos de agitación esto para poder observar más detenidamente el trayecto que las burbujas de aire siguen en el transcurso del ascenso del fondo de la olla a la superficie, en ellas se puede observar que cada burbuja sigue una trayectoria diferente en su recorrido de ascenso, con lo que se puede concluir que el sistema de agitación del horno olla nunca alcanzara un estado estacionario en el cual el campo de flujo sea siempre el mismo, esto debido principalmente a que cada burbuja de aire es de tamaño diferente y cada burbuja sigue una trayectoria diferente en su ascenso, en cuanto a las figuras de contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática, se puede observar un comportamiento del movimiento de las burbujas muy similar a lo que ocurre en la experimentación física, tamaños de burbujas diferentes y trayectorias de ascenso diferentes, es por esto que podemos afirmar con toda certeza que nuestro modelo matemático es el más adecuado para representar de manera virtual la etapa de agitación de la olla de colada continua mediante la inyección de gas argón al baño líquido de acero por medio de tapones porosos por el fondo de la olla.



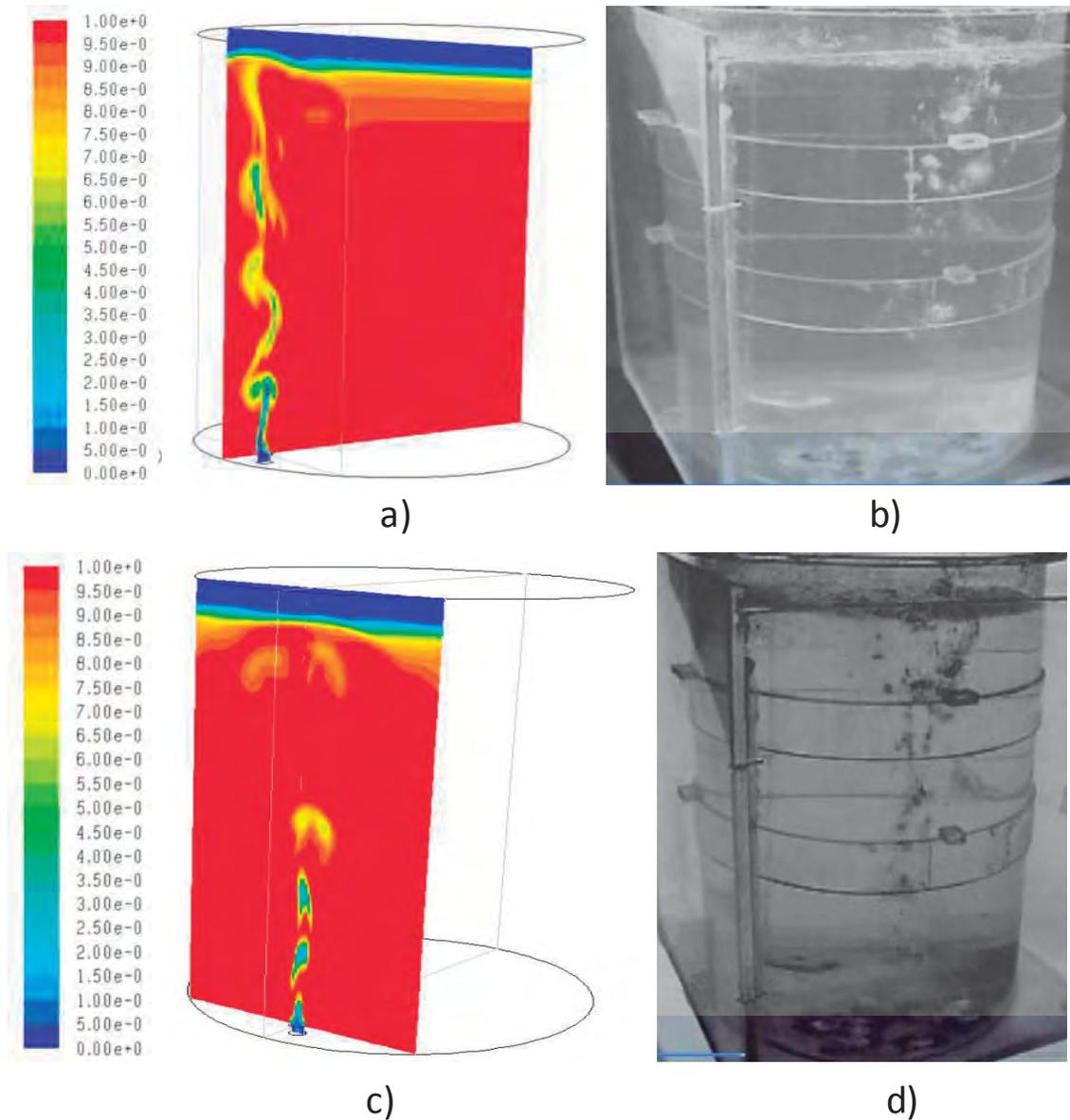


Figura 4.12 comportamiento de la pluma de gas en el baño líquido, a) y c) simulación matemática a un tiempo de convergencia de 50 y 60 segundos respectivamente b) y d) experimentación física.

Para medir el tiempo de mezclado en la simulación matemática se activo el modelo de especies y se inyectó en el centro de la olla un trazador con propiedades similares a las del agua de tal manera que este no interfiera con el patrón de flujo del agua, y para registrar los valores de concentración de especies se posicionaron dos sensores en la olla en la parte opuesta al lugar de inyección, un sensor en el fondo de la olla y otro en la parte superior tal como se aprecia en la figura 4.13 que muestra la posición de los sensores que servirán para medir el tiempo de mezclado en la olla.

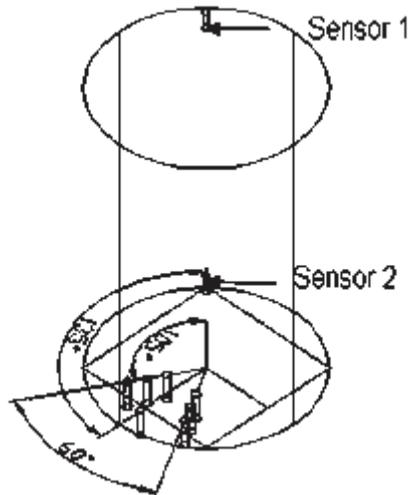


Figura 4.13 posición de de los sensores en la olla.

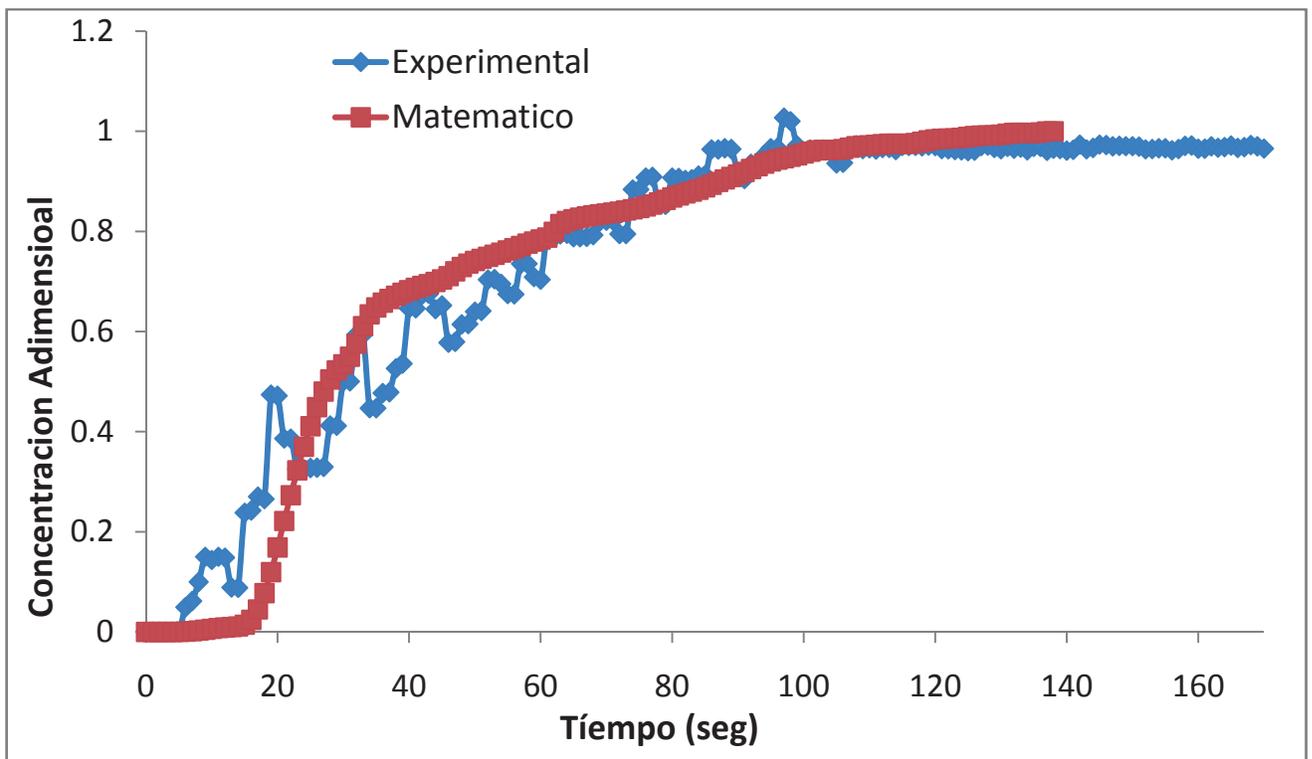


Figura 4.14 grafica de tiempos de mezclado del sensor 2 tanto para la simulación matemática como para la experimentación física.

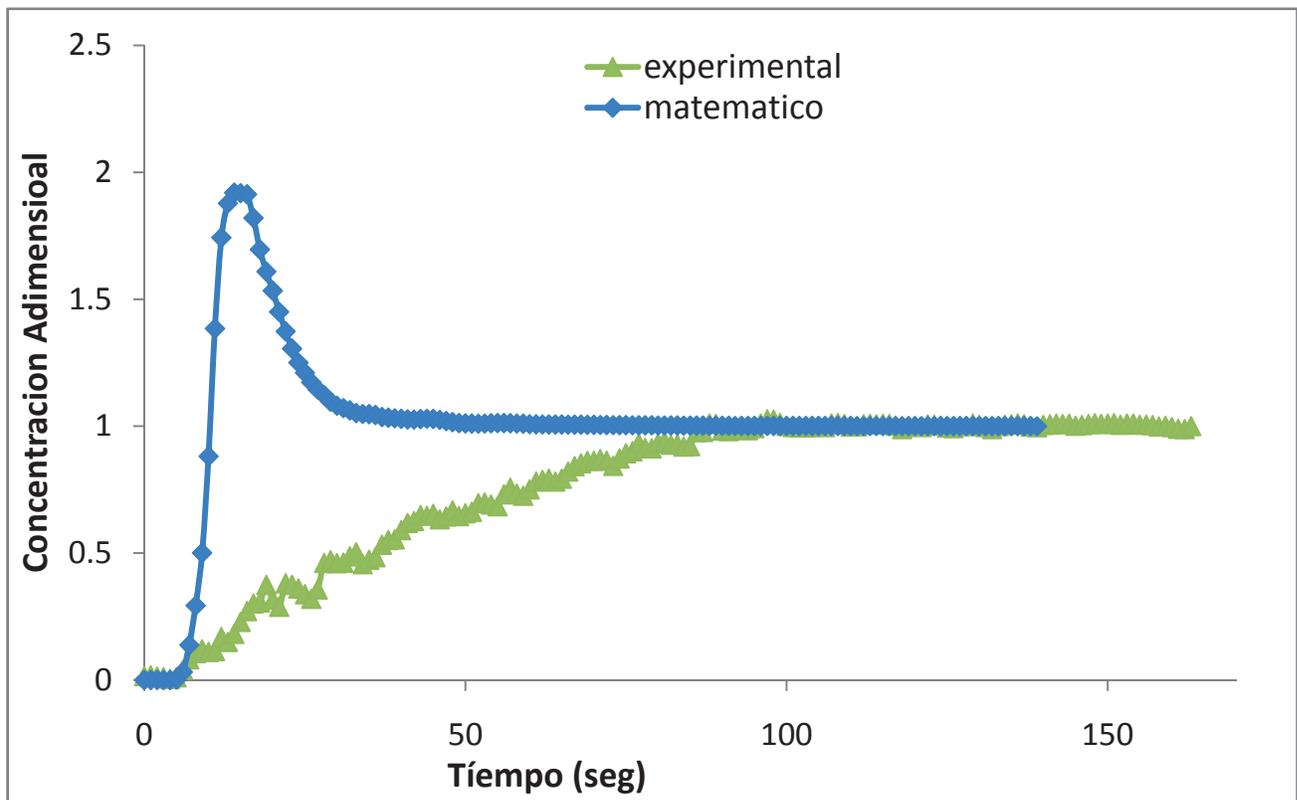


Figura 4.15 grafica de tiempos de mezclado del sensor 1 tanto para la simulación matemática como para la experimentación física.

En la grafica de concentración de especies del sensor del fondo se puede observar que tanto en la grafica obtenida experimentalmente como en la grafica obtenida mediante la simulación matemático siguen trayectorias similares hasta que alcanzan el tiempo de mezclado al 100% $\pm 5\%$, esto es debido a que la posición de los sensores en las ollas tanto del modelo matemático como en el modelo físico se encontraban en el mismo punto, pero en la grafica de concentración de especies del sensor de la superficie se observa que la grafica obtenida con el experimento físico no siguió la misma trayectoria que la grafica obtenida mediante la simulación matemática, esto sucedió debido a que el sensor tanto de la olla del modelo matemático como el sensor de la olla en el experimento físico no estaban posicionados en el mismo punto, es por esto que las curvas no siguieron las mismas trayectorias en el historial de registro de concentración de especies, aun con esto podemos comprobar que la posición del sensor en la olla no influye en el tiempo de mezclado ya que aunque las curvas siguieron trayectorias diferentes al final llegaron a el mismo punto al mismo tiempo, alcanzando el tiempo de mezclado al mismo tiempo sin importar la posición del sensor que registra la concentración de especies.

4.6 Diseño del Modificador de Flujo

El diseño del modificador de flujo consta de cinco canales direccionales los cuales tienen una forma rectangular y las medidas para cada canal son 0.0025×0.0053 m lo que nos da un área para cada canal de 0.00001325 m², con una inclinación de 45° con respecto a la vertical a través de los cuales circulara el gas para entrar al horno olla en forma rotatoria, la velocidad a la que circulara el gas a través de cada canal direccional es de 1.23270440251 m/s, con este arreglo se pretende disminuir el tiempo de mezclado y promover una mejor agitación para lograr el transporte de un mayor número de inclusiones a la superficie donde estas serán atrapadas por la escoria y con esto lograr un acero mucho más limpio.

El diseño del dispositivo, es el que se muestra en la figura 4.16, con este diseño es pretende que el ascenso de las burbujas de gas sea rotatoria, con lo cual se pretende reducir las zonas estancadas, así como el tiempo de mezclado, homogenización de la temperatura y de la composición química, acelerar la cinética de las reacciones químicas y por lo tanto coadyuvar a obtener un producto de mejor calidad a un más bajo costo de operación.

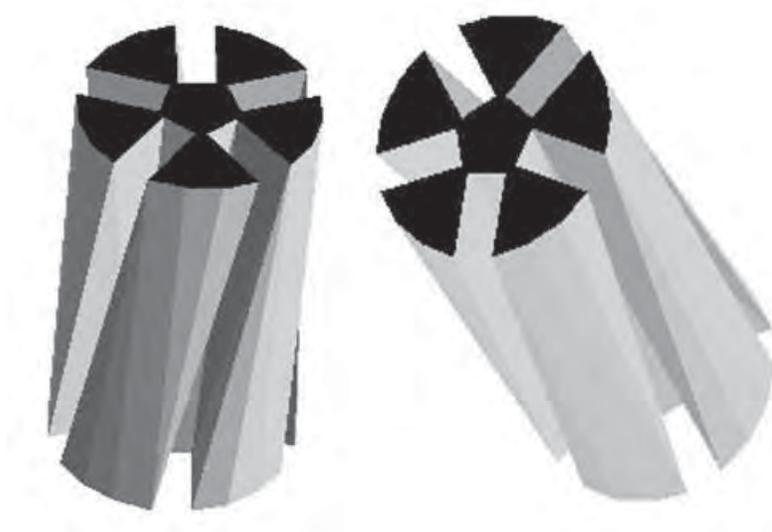


Figura 4.16 diseño del modificador de flujo.



$$\begin{aligned}
& -\rho\beta\left(\overline{g_i u_i \theta} + \overline{g_i u_i \theta}\right) + p\left(\frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_i}\right) - 2\mu\frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_k} - 2\rho\Omega_k(\overline{u_j' u_m'} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} \varepsilon_{jkm}) \\
& \qquad \qquad \qquad G_{ij} \qquad \qquad \qquad \Phi_{ij} \qquad \qquad \qquad \varepsilon_{ij} \qquad \qquad \qquad F_{ij}
\end{aligned}
\tag{4.1}$$

Donde C_{ij} es un termino convectivo, $D_{T,ij}$ es la difusión turbulenta, $D_{L,ij}$ es la difusión molecular, P_{ij} es la producción de esfuerzos, G_{ij} es la producción de bouyancia , Φ_{ij} es la presión de deformación, ε_{ij} es la disipación y F_{ij} es un término de producción por rotación. La difusión turbulenta; la presión de deformación y los términos de disipación necesariamente deben ser modelados. Por lo que $D_{T,ij}$ es evaluado usando el modelo de difusión de gradiente de Daly and Harlow ^[61]. La presión de deformación, Φ_{ij} , es modelada de acuerdo a lo propuesto por Gibson y Launder ^[62] y Launder ^[63]. El término de disipación ε_{ij} es evaluado a través del modelo de Sarkar ^[64].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_j^i (\rho\varepsilon + Y_M)
\tag{4.2}$$

Donde $Y_m = 2\rho\varepsilon M^2$ es un término adicional de disipación. El numero de match M_t es definido como.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}
\tag{4.3}$$

Donde a es la velocidad del sonido y k es la energía cinética turbulenta. La energía cinética para modelar el término especificado es obtenida a través de la traza del tensor de los esfuerzos de Reynolds.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'}
\tag{4.4}$$



El escalar de la rapidez de disipación de la energía cinética, ϵ , es calculada a través de una ecuación similar a la del modelo k- ϵ . La viscosidad turbulenta es también calculada con una ecuación similar a la del modelo k- ϵ .

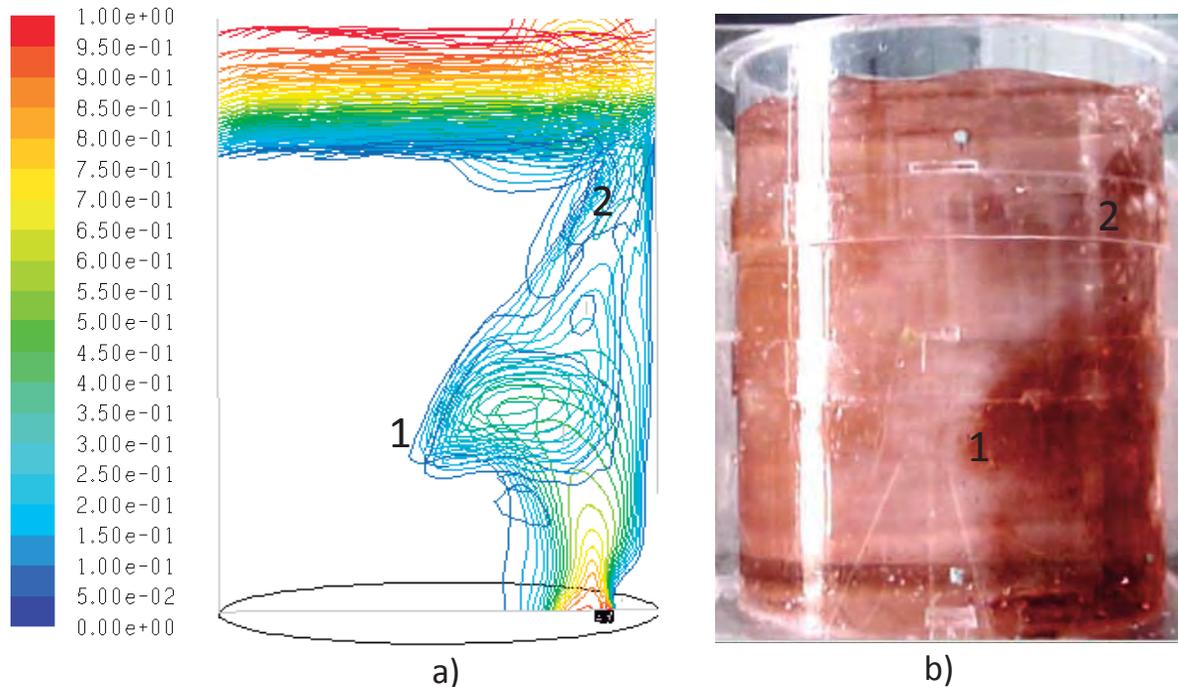


Figura 4.17 a) contornos de fases obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano y con el modelo de turbulencia RSM, (plano central de inyección) y b) fotografía de inyección de colorante en el experimento físico, para los dos casos en inyección con modificador de flujo.

En la figura 4.17 se observa que la simulación matemática con el modelo RSM representa de una manera adecuada el patrón de flujo con respecto a la experimentación física. La recirculación indicada con el numero uno es muy similar para ambos casos además de que el perfil de avance de colorante hacia la superficie también es muy semejante.

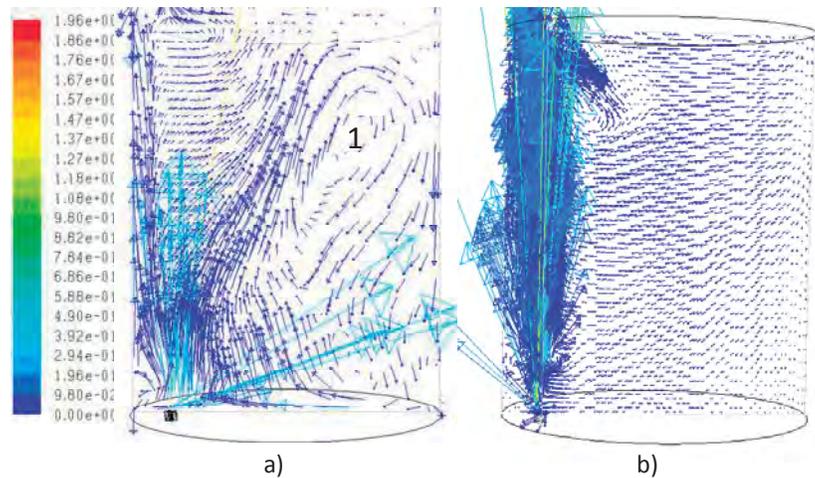


Figura 4.18 plano central de vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática en estado no estacionario con el modelo multifásico de fluido Euleriano a) con el modificador de flujo (modelo de turbulencia RSM) Y b) sin modificador (modelo de turbulencia k-épsilon estándar).

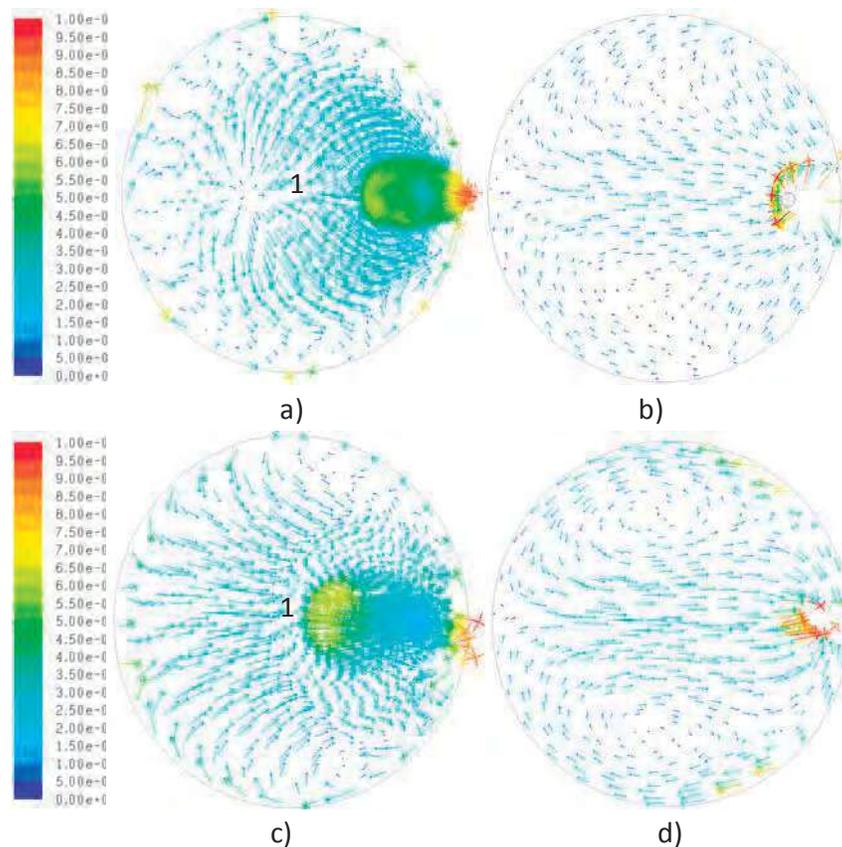


Figura 4.19 vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano en estado no estacionario (planos horizontales) a) y c) con modificador de flujo a 100 mm y a 200 mm respectivamente (modelo de turbulencia RSM) y b) y d) sin modificador a 100 mm y a 200 mm respectivamente (modelo de turbulencia k-épsilon estándar).

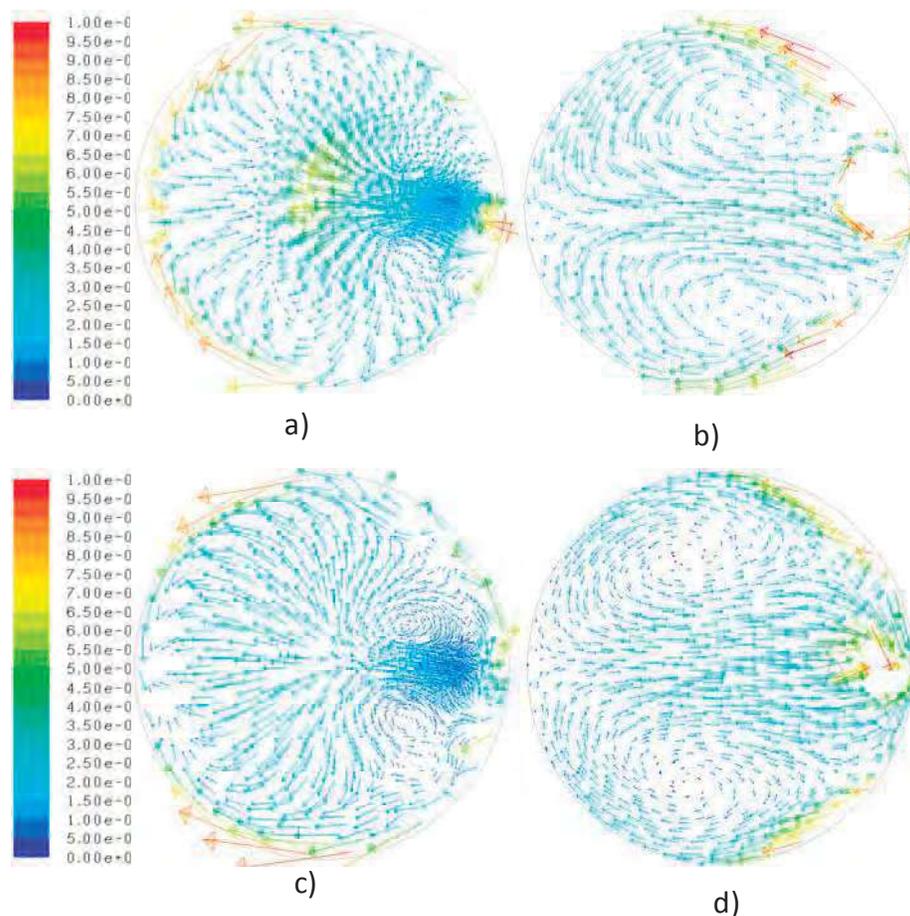


Figura 4.20 vectores de velocidad obtenidos mediante simulación matemática con el modelo multifásico de fluido Euleriano en estado no estacionario (planos horizontales) a) y c) con modificador de flujo a 300 mm y a 400 mm respectivamente (modelo de turbulencia RSM) y b) y d) sin modificador a 300 mm y a 400 mm respectivamente (modelo de turbulencia k -épsilon estándar).

En la figura 4.18 inciso a) en el plano central de inyección se observa que el fluido al salir del modificador lo hace con un cierto valor de velocidad tangencial que hace que la magnitud de la velocidad no se concentre en la dirección z como sucede en el caso sin modificador (figura 4.18 b)), sino que forma una recirculación a lo largo del plano vertical, (figura 4.18 a)) además de que aumenta la agitación en el fondo de la olla tal como se puede ver en la figura 4.19 a) donde la magnitud de los vectores de velocidad es mayor que en el caso sin modificador figura 4.19 b), así mismo se pueden observar dos corrientes que chocan en el fondo y que hacen que el fluido tenga una dirección ascendente hacia la superficie lo

cual se puede ver en la figura 4.19 a) indicada con el numero uno y que puede ayudar a la flotación de inclusiones.

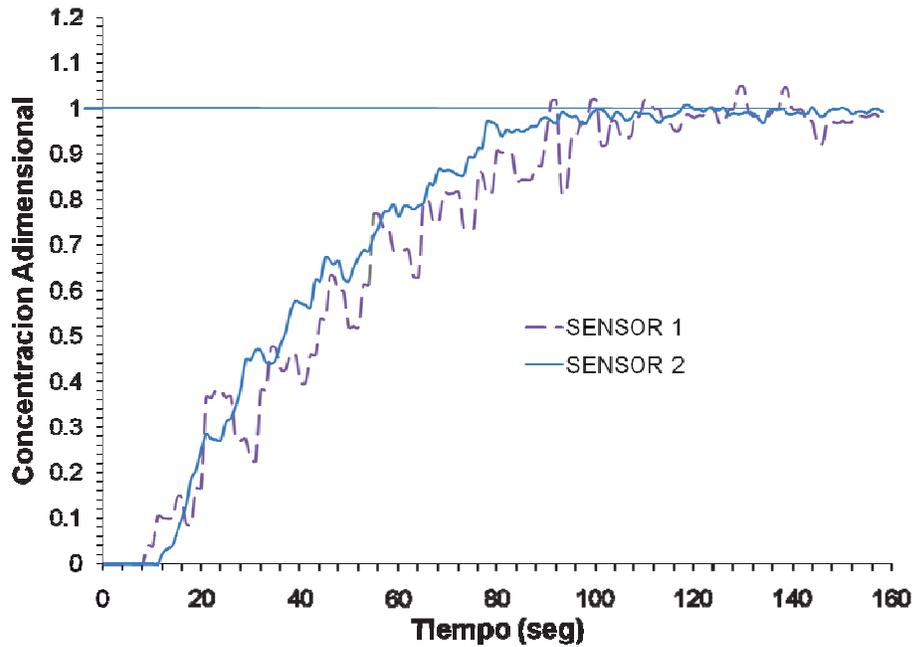


Figura 4.21 grafica de tiempos de mezclado obtenida mediante experimentación física, para el caso con modificador de flujo.

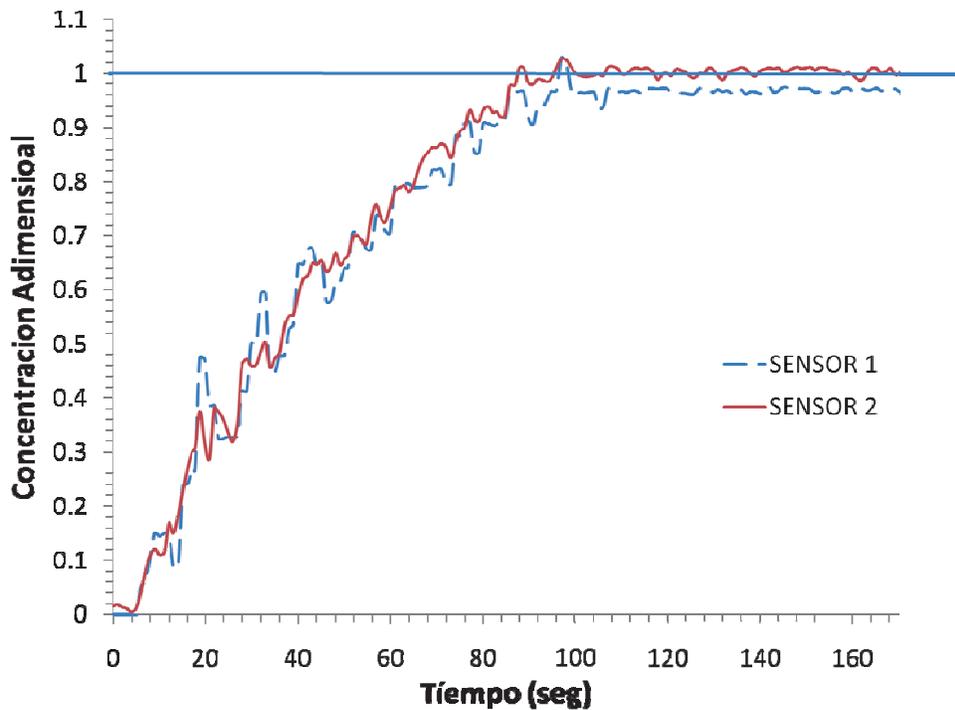


Figura 4.22 grafica de tiempos de mezclado obtenida mediante experimentación física, para el caso sin modificador.



En la figura 4.22 se muestran las curvas de tiempo de mezclado para el caso sin modificador del flujo de aire obtenidas experimentalmente para el sensor ubicado en el fondo (sensor 2) y para el sensor ubicado en la superficie (sensor 1). Donde se observa que a un tiempo de 160 segundos las concentraciones no son iguales en los dos sensores a diferencia del caso con modificador (figura 4.21), donde a ese tiempo las curvas de ambos sensores ya se han cruzado entre sí por lo que se puede decir que el modificador de flujo propicia una mayor transferencia de cantidad de movimiento en el fondo que ayuda a que el sensor ubicado en el fondo alcance con mayor rapidez la misma concentración detectada por el sensor ubicado en la superficie. Esto se puede observar más claramente al comparar las curvas del sensor del fondo para ambos casos donde la curva del sensor con modificador muestra más fluctuaciones, originadas por gradientes de velocidad mayores que para el caso sin modificador. Estas mayores fluctuaciones también se detectan en la superficie para el caso con modificador donde la curva del sensor ubicado en la superficie muestra estas fluctuaciones con mayor frecuencia a través del tiempo que para el caso sin modificador.

4.8 Conclusiones

1. El modelo multifásico de fluido Euleriano en combinación con el modelo de turbulencia k- ϵ estándar y el modelo de discretización de ecuaciones Quick fue el que mejor simuló la agitación del líquido con inyección de aire sin modificador de flujo.
2. El tiempo de mezclado no depende de la posición del sensor.
3. El modelo multifásico de fluido Euleriano en combinación con el modelo de turbulencia RSM y el modelo de discretización de ecuaciones de segundo orden fue el que mejor simuló la agitación del líquido con inyección de aire con modificador de flujo.
4. El aire al pasar a través del modificador de flujo adquiere una cierta velocidad tangencial que se transmite al líquido y provoca una mayor agitación en el fondo y evita que la magnitud de la velocidad se concentre principalmente en la dirección zeta.
5. El modificador de flujo disminuye el tiempo de mezclado.

Referencias





1. Szekely J, Carlson G, Helle L., "*Ladle Metallurgy*", Springer-Verlag, New York-Berlin Heidelberg 1988: 1-26.
2. Constantino Espinosa, "*Evolución de las Inclusiones no Metálicas en el Proceso de Elaboración del Acero*" p. 4,10/03/2005.
3. Sano M, Mori K., "*Fluid Flow and Mixing Characteristics in a Gas-stirred Molten Metal Bath*", Trans Iron Steel Inst Jpn 1983: 23: 169.
4. Skoglund, V. J.: "*Similitude – Theory and Applications*", International Textbooks, New York, (1967).
5. González Bernal Renato, Tesis de Maestría, "Simulación Física de la Agitación del Acero Líquido Dentro del Horno Olla", UMSNH; México, Agosto de 2008
6. R.J. Fruehan, "*Ladle Metallurgy Principles and Practices*", Iron and Steel Society, USA, 1985, pp. 1-2.
7. Sanjib CHAKRABORanTdYYogeshwarSAHA, "*Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes*", ISIJ International. Vol. 31 (1991), No. 9, pp. 960-967.
8. Y. Heand Y. Sahai., "*Fluid Dynamics in Channel Reactors Stirred by Submerged Gas Injection*", Metall Trans. B, 18B (1987), 81.
9. Department of Materials Science and Engineering, The Ohio State University. Columbus, Ohio, "*The Effect of Tracer Density on Melt Flow Characterization Continuous Casting Tundishes-A Modeling Study*", ISIJ International, Vol. 35 (1995). No. 2, pp, 163 169.
10. Robertson, A. D., and Sheridan, A.T. "*WATER MODELLING OF LIQUID STEEL AT SWINDEN LABORATORIES*", J. Iron Steel Inst., Vol. 208, (1970), pp 625-632; pp, 2.
11. K. G. Venkatesan, S. K. Bera, S. Khurana – Foseco India Limited Water Modelling, "*A tool for Effective Designing of Turbulence-suppressing Tundish Impact Pad, TURBOSTOP*", Foseco International Limited © Foseco International Limited 2002; pp 7,1,2.
12. Anu Jauhiainen, Lage Jonsson and Dong-Yuan Sheng., "*Modelling of alloy mixing into steel*", Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001; 30: 242-253.
13. Mazumdar, D, y R.I.L. Guthrie, "*The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems*". ISIJ International, 1995, 35 (1): pp. 1-20.





14. José Ángel Ramos Banderas, *“Modelación Física y Matemática de la Inyección Rotacional de Burbujas de Gas en el Horno Olla”*.
15. G.G. krishnamurthy, S.P. Mehrotra y A. Ghosh, *“Fluid flow and Bath Temperature Stratification in Gas Stirred Ladles”*, Metallurgical and Materials Transactions B, (1988), 19B, pp. 839-850.
16. Hasmet TURKOGLU and Bakhtier FAROUK., *“Mixing Time and Circulation Rate in Steelmaking Ladle With Vertical Gas Injection”*, ISIJ International, Vol. 31 (1991), No. 12, PP. 1371-1380.
17. Mietz, y F. Oeters, *“Model Experiments on Mixing Phenomena in Gas Stirred Melts”*. Steel Research, (1988). 59(52), pp. 52-59.
18. S. Joo, R. Guthrie and C. Dobson., *“Modelling of Heat Transfer, Fluid Flow and Inclusion Flotation in Tundishes”*, Steelmaking Proceedings, Vol. 72, ISS-AIME. Chicago, (1989), 401.
19. M. Iguchi, K. Nakamura, y R. Tsujino. *“Mixing time and fluid flow phenomena in liquids of varying kinematic viscosities agitated by bottom gas injection”*. Metallurgical and Materials Transaction B, (1998). 29B (June), pp. 569-575.
20. Y Takatzuka y M. Iguchi, *“The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems”* ISIJ International, (2001), Vol.41, No.2, pp. 124-127.
21. K. Aramaki. *“Bottom Blown Gas Blowing Apparatus for Molten Metal Ladle”*, Num. Pat. 5945063, fecha pat. Aug. 31, (1999), United States Patent.
22. Miao-Yong ZHU, Takeo INOMOTO, Ikuo SAWADA y Tse-Chiang HSIAO., *“Fluid Flow and Mixing Phenomena in the Ladle Stirred by Argon Through Multi-Tuyere”*, ISIJ International, Vol.35 (1995), No. 5, pp. 472-479.
23. R.I.L. Guthrie, *“Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single and dual plug bubbling operations”*. Metallurgical and Materials Transactions B, (1992), 23B, pp. 765-778.
24. A.H. Castillejos, M.E. Salcudean, y J.K. Brimacombe, *“Fluid Flow and Bath Temperature Stratification in Gas Stirred Ladles”*. Metallurgical and Materials Transaction B, (1989). 20B (October), pp. 603-611.
25. O.J. Llegbusi, y J. Szekely, *“The Modeling of Gas-Bubble Driven Circulation Systems”*. ISIJ International, (1990). 30 (9), pp. 731-739.





26. M. Salcudean, "Computational of Three-Dimensional Flow Associated with Heat and Mass Transfer in Gas-Agitated-Liquid Reactors". Numerical Heat Transfer, (1988). 14, pp. 97-111.
27. S.T. Johansen, y F. Boysan, "Fluid dynamics in bubble stirred ladles: Part II. Mathematical modeling". Metallurgical and Materials Transactions B, (1988), 19B (October), pp. 755-764.
28. D. Mazumdar, y R.I.L. Guthrie, "An Assessment of a Two Phase Calculation Procedure for Hydrodynamic Modelling of Submerged Gas Injection in Ladles". ISIJ International, (1994). 34 (5), pp. 384-392.
29. H. Turkoglu, y B. Farouk. "Numerical Computations of Fluid Flow and Heat Transfer in Gas Stirred Liquid Bath", National Heat Transfer Conference. (1988), pp. 755-764.
30. J.F. Tapia Ortiz, Tesis de Maestría: "Modelación Matemática de Flujo de Fluidos, Mezclado y Transferencia de Calor en Ollas de Acero Agitadas con Argón", Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, (2003), pp. 17-27.
31. L. Jonsson, y P. Jonsson, "Modeling of the Fluid Conditions Around the Slag Metal Interface in a Gas-Stirred Ladle". ISIJ International, (1996). 36(9), pp. 1127-1134.
32. H.J. Richter, J.T. Laaspere, y J.M. Fitzpatrick. "Experimental and Production, Metallurgical Processes for Early Twenty-First Century". (1994), The Minerals, Metals & Materials Society, pp.1127-1134.
33. Anu Jauhiainen, Lage Jonsson and Dong-Yuan Shen, "Modeling of alloy mixing into steel", Scandinavian Journal of Metallurgy 2001; 30: 242-253.
34. J. Szekely, J. W. Evans y J. K. Brimacombe, "The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations", A Wiley-Interscience, 1a Ed. (1988), pp: 75-195.
35. R.J. Fruehan, "Ladle Metallurgy Principles and Practices", Iron and Steel Society, Chelsea, 1a ed. (1985).
36. A. T. Peters, "Producción Siderúrgica", Limusa, 1ra ed. (1987), pp: 44-251.
37. F. P. Incropera y D. P. de Phys, "Fundamentals of Heat Transfer", Prentice Hall 4a ed. (1999), New York, pp: 825-860.
38. M. Díaz Cruz y M. Hernández Velásquez, "Siderurgia II, Convertidores", Material Didáctico, IPN-ESIQIE, 1ª ed. (2001), pp: 108-123.





39. AISE, "The Making, Shaping and Treating of Steel" - Steelmaking and Refining Volume, The AISE Steel Foundation.
40. Anu Jauhiainen, Lage Jonsson and Dong-Yuan Sheng, "Modeling of Alloy mixing into Steel" Scandinavian Journal of Metallurgy 2001, 30: 242 – 253.
41. S.P. Lobanov, V.G. Ovsyannikov and A. V. Sarychev "Bottom blowing tuyeres for 175-ton steel Ladles in service at an open hearth furnace shop" Refractories and industrial ceramics, 11 January 2005.
42. Szekely, J.: "Fluid Flow Phenomena in Metals Processing", Academic Press, New York, (1979).
43. O. Levenspiel, "Ingeniería de las reacciones químicas", Reverte, 2ª ed. (2001), pp.107-118.
44. D. Mazumdar, H. B. Kin y R. I. L. Guthrie, "Modeling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study", Iron making and Steelmaking, Vol. 27 (2000), No.4, pp. 302-309.
45. Kanehiro Ogawa and Toshio Onoue, "Mixing and Mass Transfer in Ladle Refining Process" ISIJ International, Vol. 29 (1989), No. 2, pp. 148 –153.
46. Olusegun J. Ilegbusi, Manabu Iguchi and Walter Wahnsiedler "Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations" Chapman and Hall/CRC.
47. J. Mathieu y J. Scott, "An introduction to turbulent flow", Cambridge 1a ed. (2000), pp. 1-30.
48. R. B. Birt, W. E. Stewart y E. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", Reverte, 1a Ed. (1993), pp. 1-12.
49. G. Solorio Díaz, "Control de turbulencia y flujo de acero líquido en un distribuidor de colada continua mediante la buza de alimentación", Tesis doctoral, (2004), Cap. I y II.
50. Chandrashekar Damle And Yogeshwar Sahai. "A Criterion For Water Modeling Of Non-Isothermal Melts Flows in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 36, No. 6, 1996, pp. 681-688.
51. Laboratorio de Simulación de Procesos y Dinámica de Fluidos, "GAMBIT manual del usuario", DIM-ESIQIE-IPN, (1998), PP. 1-15.
52. Laboratorio de Simulación de Procesos y Dinámica de Fluidos, "FLUENT manual del usuario", (2003), DIM-ESIQIE-IPN, PP. 1-30.
53. Fluent User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH., Vols 1-4, 1999.
54. Julian Sekeli, "The Mathematical And Physical Modeling Of Metals Processing Operations." Department Of Materials Science And Engineering, Massachusetts Institute Of Technology. Cambridge, Massachusetts 02139.
55. B. E. Launder And D. B. Spalding: Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, 1974, pp. 301- 313.
56. W. P. Jones And B. Launder: Int J. Heat And Mass Transfer, Vol. 15, 1972; pp: 301-313.
57. A. Ramos-Banderas, R.D. Morales, L. García-Demedices and M. Díaz-Cruz, "Mathematical simulation and modeling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes", ISIJ International, Vol. 43, No.3, 2003, pág.653.
58. B.E. Launder, "Second-moment closure: Present.... and Future?" "International journal of heat fluid flow", Vol. 10, 1989, pág.282.





61. B.J. Daly and F.H. Harlow, "*Transport equations in turbulence*", Phys. Fluids, Vol. 13, 1970, pág.2634.
62. M.M. Gibson and B.E. Launder, "*Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer*", Journal of fluid mechanics, Vol. 86, 1978, pág.491.
63. B. E. Launder, "*Second-moment closure and its use in modeling turbulent industrial flows*", International journal for Numerical Methods, Vol. 9, 1989, pág.963.
64. S. Sarkar and L. Balakrishnan, "*Application of a reynolds stress turbulence model to the compressible shear layer*", ICASE Report 90-18, NASA CR 182002, (1990).

