



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS**

**“MODELADO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE  
REMOCIÓN DE INCLUSIONES NO METÁLICAS EN  
OLLAS AGITADAS CON INYECCIÓN CÉNTRICA DE  
GAS”**

**PRESENTA:**

**HERNÁNDEZ GARCÍA ALAN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**ASESOR: DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.**

**2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE:** Prof. Carlos Gonzalez Rivera  
**VOCAL:** Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago  
**SECRETARIO:** Prof. Marco Aurelio Ramírez Argáez  
**1er SUPLENTE:** Prof. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo  
**2do SUPLENTE:** Prof. Claudia Flores Vargas

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Laboratorio 203, Edificio D, Facultad de Química, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez**

**SUSTENTANTE:**

---

**Hernández García Alan**



## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme desarrollar mis estudios en sus aulas, poner en mi camino a profesores y amigos que dotaron a esta etapa de conocimiento y enseñanzas. Así mismo por darme la posibilidad de cumplir mi meta de fungir como Ingeniero.

Agradezco a DGAPA-PAPIIT por el apoyo económico brindado al proyecto con clave IN102922 y título “modelado matemático de la cinética de remoción de inclusiones en ollas agitadas con inyección céntrica de gas” para la realización de esta tesis; llevada a cabo bajo la tutela del Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.



## Contenido del trabajo.

1.	Introducción.....	1
1.1	Siderurgia en México y el mundo .....	1
1.2	Proceso de fabricación de acero.....	2
1.2.1	Ruta Alto Horno – BOF.....	3
1.2.2	Proceso de reducción directa y horno de arco eléctrico.....	4
1.3	Horno olla (LF).....	5
1.4	Inclusiones y su influencia en las propiedades del acero .....	7
1.5	El modelado matemático y físico como herramientas de la Ingeniería de Procesos. ..	9
1.5.1	Modelos matemáticos.....	9
1.5.2	Modelos físicos.....	10
1.6	Estado del arte .....	11
1.7	Hipótesis.....	16
1.8	Objetivos.....	16
2.	Metodología .....	17
2.1	Suposiciones.....	17
2.2	Ecuaciones Gobernantes.....	18
2.2.1	Ecuación de fracción volumen.....	18
2.2.2	Ecuación de continuidad.....	18
2.2.3	Ecuación de transporte de momentum.....	19
2.2.4	Modelo k-ε realizable.....	19
2.2.5	Modelo de Fase Discreta.....	21
2.3	Condiciones iniciales y de frontera.....	22
2.4	Procedimiento de Solución.....	25
3.	Resultados y Análisis.....	26
3.1	Validación.....	26
3.2	Resultados de la remoción de inclusiones (Prueba para los 3 flujos).....	31
3.3	Resultados de la remoción de inclusiones (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión).....	38
3.4	Posibles rutas a seguir en futuros trabajos de esta línea de investigación.....	43

4. Conclusiones.....	45
Referencias .....	46
Anexos.....	48
A. Tabla de símbolos .....	48
Anexo B. Resolución en ANSYS FLUENT .....	49
B.1 General .....	49
B.2 Modelos.....	50
B.3 Materiales.....	57
B.5 Controles y cálculo.....	60
B.6 Seguimiento de las partículas discretas. ....	62

## Índice de Figuras

Figura 1 Producción global de acero en 2023 [2] .....	2
Figura 2 Rutas generales para la fabricación de acero [3].....	3
Figura 3 Esquema general del horno olla [5] .....	6
Figura 4 Esquema del modelo y sus fronteras. (Utilizada en el modelo 2D).....	23
Figura 5 Estadísticas de la malla. ....	26
Figura 6 Posición de los perfiles de velocidad considerados para la validación.....	27
Figura 7 Comparación de los perfiles de velocidad axial predichos por el modelo matemático y la practica experimental. ....	28
Figura 8 Vectores de velocidad del agua para el flujo bajo de inyección. ....	29
Figura 9 Vectores de velocidad del agua para el flujo medio de inyección.....	30
Figura 10 Comparación de los perfiles de energía cinética turbulenta predichos por el modelo matemático y la practica experimental. ....	30
Figura 11 Gráfica de remoción de inclusiones, densidad de inclusiones adimensional contra el tiempo de remoción (Diámetro de inclusión 20 micras). ....	32
Figura 12 Comparación en el porcentaje de inclusiones removidas por los 3 flujos de inyección .....	34
Figura 13 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 0 segundos de remoción.....	35
Figura 14 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 20 segundos de remoción.....	35
Figura 15 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 40 segundos de remoción.....	36
Figura 16 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 60 segundos de remoción.....	37
Figura 17 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 80 segundos de remoción.....	38

Figura 18 Gráfica de remoción de inclusiones, densidad de inclusiones adimensional contra el tiempo de remoción (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión). .....	39
Figura 19 Representación de la distribución de inclusiones con diferentes diámetros. ....	40
Figura 20 Comparación en el porcentaje de inclusiones removidas (Cálculo con distribución de tamaños).....	42
Figura 21 Pestaña general de ANSYS FLUENT.....	49
Figura 22 Pestaña del modelo multifásico.....	50
Figura 23 Pestaña del modelo multifásico (Fases).....	51
Figura 24 Pestaña del modelo multifásico (Interacción entre fases).....	51
Figura 25 Pestaña del modelo de fase discreta. ....	52
Figura 26 Pestaña del modelo de fase discreta (creación de la inyección). ....	53
Figura 27 Pestaña del modelo de fase discreta (Modelos físicos de las partículas 1).....	54
Figura 28 Pestaña del modelo de fase discreta (Modelos físicos de las partículas 2).....	54
Figura 29 Pestaña de inyección para la distribución de tamaños de inclusión. ....	55
Figura 30 Pestaña del modelo de turbulencia.....	56
Figura 31 Vista general del apartado de materiales. ....	57
Figura 32 Materiales agregados a la simulación.....	58
Figura 33 Condición de Inlet. ....	59
Figura 34 Condición de outlet. ....	59
Figura 35 Condición en las paredes.....	60
Figura 36 Valor de los controles. ....	61
Figura 37 Valores para correr la simulación. ....	61
Figura 38 Seguimiento de partículas .....	62
Figura 39 Propiedades disponibles en el seguimiento de partículas .....	63

## Índice de tablas

Tabla 1 Secuencia de operación del horno olla [6].....	7
Tabla 2 Resumen de los trabajos relacionados con la remoción de inclusiones. ....	15
Tabla 3 Dimensiones del modelo físico y el prototipo de horno olla a escala 1/17. ....	23
Tabla 4 Condiciones de frontera. ....	24
Tabla 5 Condiciones de flujo para las 4 pruebas a diámetro de inclusión constante. ....	24
Tabla 6 Ecuaciones correspondientes de las regresiones exponenciales de las curvas de remoción de inclusiones.....	33
Tabla 7 Porcentaje de inclusiones eliminadas en el sistema a diferentes tiempos de remoción.....	33
Tabla 8 Ecuación de las curvas utilizando el flujo baño de inyección y diferente condición para los diámetros de inclusión.....	40
Tabla 9 Porcentaje de inclusiones eliminadas en el sistema a diferentes tiempos de remoción (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión). ....	41
Tabla 10. Tabla de símbolos. ....	48



# 1. Introducción

## 1.1 Siderurgia en México y el mundo

En México como en el mundo, el acero ha desempeñado un papel esencial en el desarrollo industrial, social y económico, es reconocido como uno de los materiales fundamentales y con una alta versatilidad gracias a su presencia en una gran cantidad de industrias, desde la automotriz y la minera, hasta la industria de la construcción, convirtiendo a este material en un componente clave en la vida moderna. Datos de la CANACERO (Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero) [1] en el año 2022 posicionan a México en el lugar catorce como productor de acero a nivel mundial, con una producción de 19.7 y 18.2 millones de toneladas en piezas terminadas y acero líquido respectivamente, donde hasta un 54% de la producción de acero es a partir del reciclaje de este. La industria siderúrgica aporta un 1.6% en el PIB Nacional, 5.5% en el Producto Interno Bruto (PIB) Industrial y 9.7% del PIB Manufacturero, esto lleva a que la industria siderúrgica sea uno de los sectores que contribuyen al desarrollo del país a corto y mediano plazo.

El comercio internacional de acero se muestra como un factor importante en la economía mundial. Los principales países productores de acero se muestran como los principales exportadores, siendo China el líder mundial con una producción de 1995 millones de toneladas en 2023, un 0.4% de aumento en comparación con el año anterior [2] .

Por otra parte, India mostró su desarrollo industrial y su creciente papel en el comercio internacional con un crecimiento del 11.4% en su producción de acero, posicionándolo como el segundo máximo productor de acero a nivel global, seguido de Estados Unidos en esta lista con un 7.2% del total de la producción mundial [2] (ver **Figura 1**).

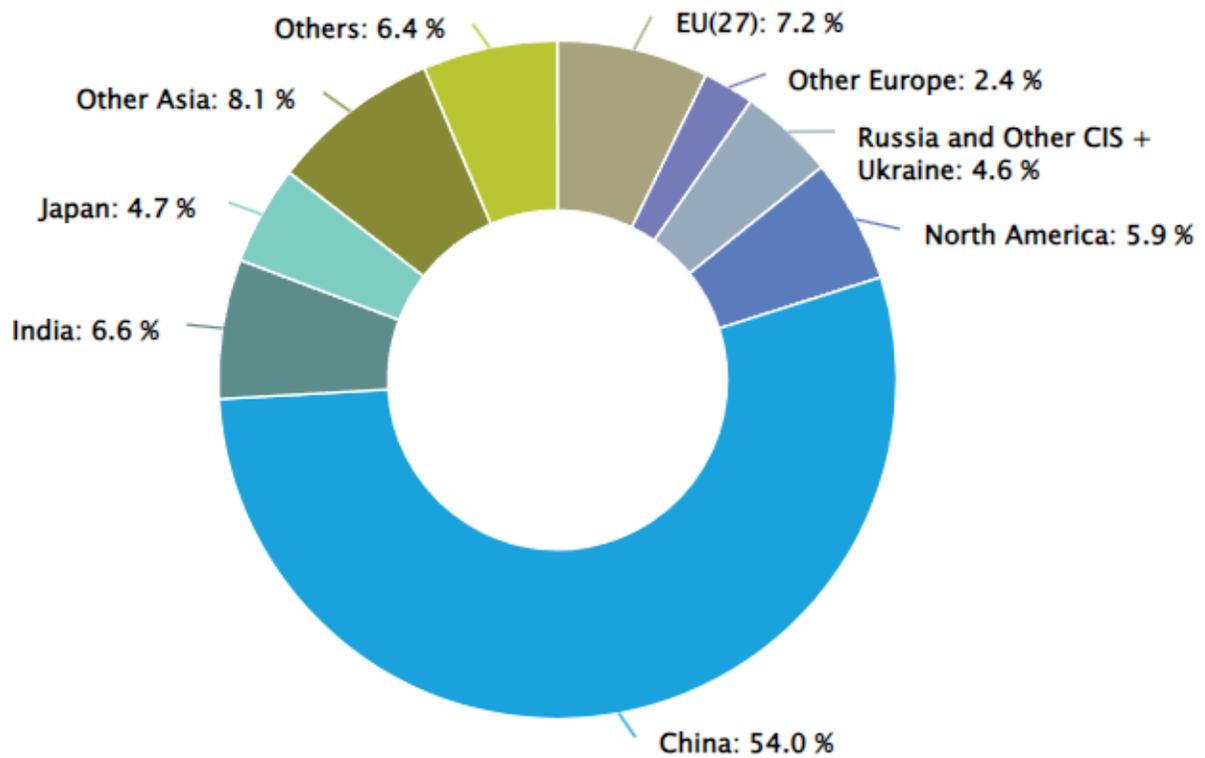


Figura 1 Producción global de acero en 2023 [2]

## 1.2 Proceso de fabricación de acero

En la actualidad existen dos caminos principales para la fabricación de acero: el primero es utilizando el proceso de alto horno (ironmaking) y la aceración (steelmaking) a través del Horno Básico de Oxígeno (BOF); la segunda vía sería a partir del proceso de reducción directa (ironmaking) y la aceración (steelmaking) usando al Horno de Arco Eléctrico (HAE o EAF por sus siglas in inglés), en ambos casos el acero obtenido será tratado en un proceso de siderurgia secundaria el cual se abordará más adelante. En la **Figura 2** se ve de manera esquemática la ruta alto horno – BOF y también se aprecia la ruta no integrada para fabricar acero que no parte del mineral y que funde chatarra de acero en el HAE.

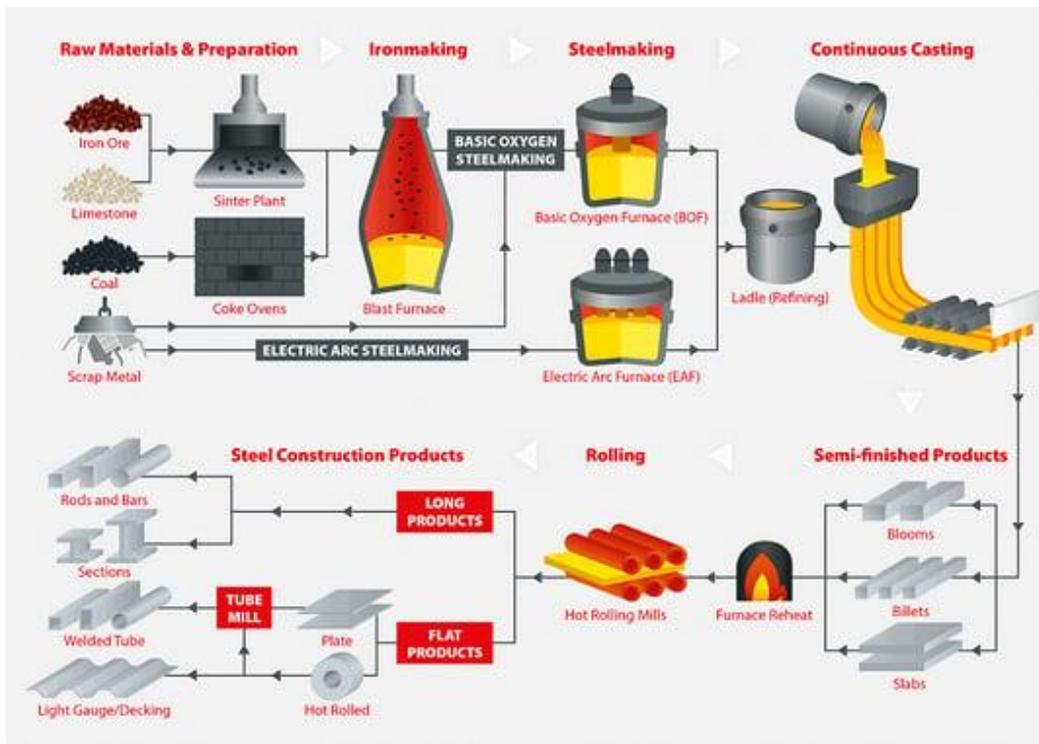


Figura 2 Rutas generales para la fabricación de acero [3]

### 1.2.1 Ruta Alto Horno – BOF.

Este proceso comienza con las materias primas que son adicionadas en el alto horno, estas de forma general son: el mineral de hierro en forma de pelets, coque el cual funge como el energético básico de este proceso y genera el gas reductor del mineral (CO), sinter el cual es una masa porosa conformada por el mineral de hierro, derivados de hierro generados en el propio proceso siderúrgico; y esto es mezclado con calizas, finos de coque y dolomita. Una vez las materias primas terminan su procesamiento, son enviadas a los altos hornos, los cuales están conformados por una estructura de forma cilíndrica con más de cincuenta metros de altura, estos hornos están recubiertos en su interior por ladrillo refractario. En el alto horno se reducen los óxidos de hierro presentes en los pelets y el sinter, por la base del alto horno es introducido aire caliente a alta presión que es capaz de encender el coque y

el gas CO producido reduce el mineral de hierro bajo temperaturas cercanas a 1650 °C. En la parte baja del alto horno encontramos un crisol de grafito, el cual será el encargado de recibir el arrabio líquido (una aleación líquida base Fe saturado en carbono) que a partir de piqueras y canales es redirigido a carros torpedo en el cual se lleva a cabo una primera limpieza del arrabio, en donde suelen agregarse reactivos como carburo de calcio y magnesio para promover la desulfuración del arrabio. Durante este trabajo se genera escoria como subproducto de fundición, la cual suele enfriarse, almacenarse o venderse para diferentes fines.

La fabricación de acero suele continuar agregando chatarra en cierta cantidad dentro del BOF (Basic Oxygen Furnace). Una vez cargada la chatarra, se carga al convertidor el arrabio producido en el proceso del alto horno a través de ollas de transporte operadas por grúas viajeras. La refinación se realiza por medio de la inyección de oxígeno con un jet supersónico inyectado a través de lanzas superiores. En este proceso se oxidan los elementos no deseados dentro del acero, esto produce una disminución en la composición principalmente de Carbono, Silicio, Fosforo y Manganeso [4] . El proceso realizado en el BOF es energéticamente sustentable, esto quiere decir que no será necesario agregar energía al horno para realizar las reacciones de oxidación, si no que las mismas reacciones exotérmicas generan la energía requerida para realizar el proceso completo y mantener el baño líquido. El acero producido en el BOF es transferido a grandes ollas donde mediante ferroaleaciones se ajusta la composición química de acuerdo con lo especificado en un inicio con el cliente, se uniformiza química y térmicamente al baño, se le elimina el azufre y el oxígeno así como las inclusiones no metálicas.

### 1.2.2 Proceso de reducción directa y horno de arco eléctrico.

El proceso de reducción directa da como resultado hierro esponja, el cual es hierro casi puro pero con algo de ganga. Las materias primas agregadas al horno de reducción son pelets de mineral de hierro de alta ley, que viajará en contra corriente al gas inyectado, el cual es una mezcla de hidrogeno y monóxido de carbono a una temperatura aproximada de 960 °C. En

la parte inferior del horno es agregado un segundo gas conocido como gas de enfriamiento donde también se carburiza el hierro reducido en la parte superior del sistema.

La producción de acero líquido se da a partir del horno de arco eléctrico (HAE), cargando una mezcla de chatarra y hierro esponja. Además este reactor puede producir acero solamente utilizando chatarra como materia prima sin usar mineral, lo que se conoce como ruta no integrada. El hierro esponja y la chatarra son cargados a partir de cestas, y se introducen al horno donde electrodos de grafito que proporcionan la energía eléctrica para fundir la carga y producir así el acero líquido.

### 1.3 Horno olla (LF)

En los últimos años los hornos olla se han utilizado ampliamente para llevar a cabo la mayor parte del refinado secundario del acero de una manera económica. Una simple olla equipada con un tapón inferior para inyectar argón y una tapa con electrodos funciona como un horno de arco para calentar el baño de acero. La tapa realiza la protección del acero ante la oxidación atmosférica. El horno se encuentra recubierto en la parte interior por material refractario para la protección de la cuchara del acero líquido además de que permite reducir las pérdidas de calor en el sistema, en la **Figura 3** se muestra un esquema general del horno olla, así como sus componentes principales.

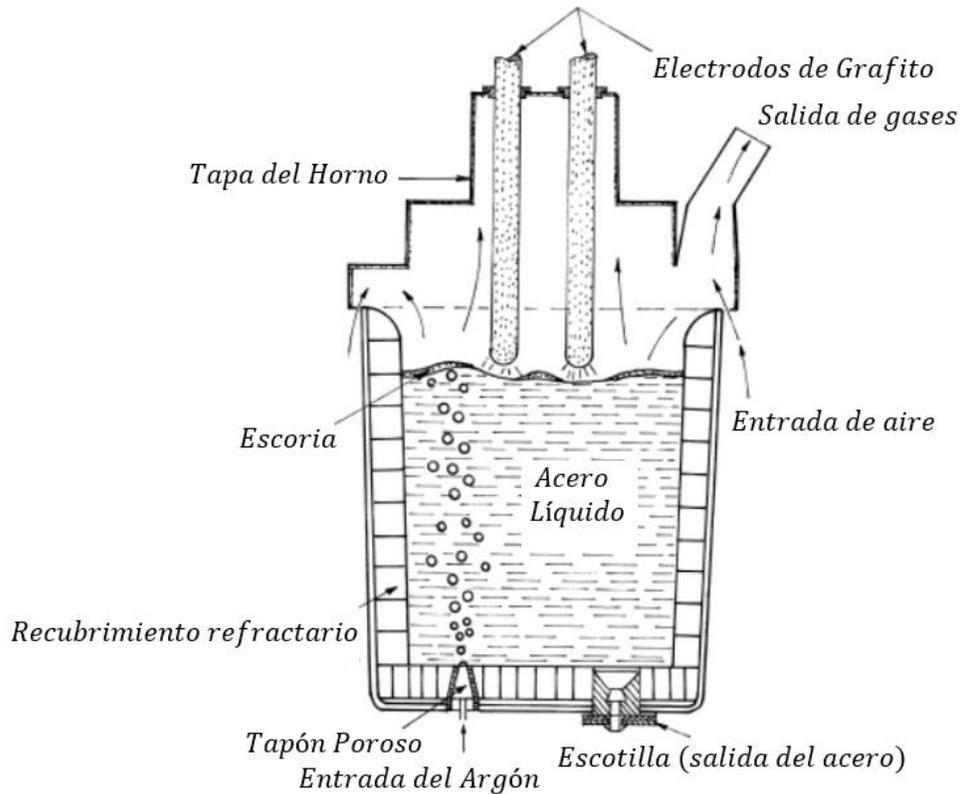


Figura 3 Esquema general del horno olla [5].

El proceso de inyección de argón desde la parte baja del horno dota de agitación al sistema, esto permite homogenizar química y térmicamente al baño de acero líquido ya que genera una recirculación del fluido de forma radial a la posición de la inyección, de esta manera la turbulencia dentro del horno acelera los procesos como las reacciones químicas y el transporte y eliminación de inclusiones. Los procesos de refinación que se realizan en el horno olla son la desoxidación del acero líquido, desulfuración, la eliminación de inclusiones no metálicas y la desgasificación. La secuencia de la refinación secundaria se resume en la **Tabla 1.**

Tabla 1 Secuencia de operación del horno olla [6] [6]

<i>Etapa del proceso</i>	<i>Descripción</i>
<i>Desoxidación y escorificación</i>	<p>Para eliminar el oxígeno disuelto en el baño se añade Al, Mn o Si y escorificantes, generando las siguientes reacciones:</p> $2Al + 3O \rightarrow Al_2O_3$ $Si + 2O \rightarrow SiO_2$ $Mn + O \rightarrow MnO$
<i>Calentamiento</i>	<p>Se lleva a cabo un calentamiento con una duración de hasta 10 minutos, utilizando los 3 electrodos del horno olla que pueden generar una rampa térmica de 3 a 5 °C/min</p>
<i>Toma de muestra</i>	<p>Es necesario realizar un ajuste de carga para los elementos aleantes en el acero, para esto, se ajusta la composición para lograr el grado de acero requerido.</p>
<i>Desulfuración</i>	<p>Las reacciones producidas en esta etapa permiten eliminar el azufre en exceso en la aleación.</p> <p>Desulfuración:</p> $Ca + S \rightarrow CaS$ $CaO + S \rightarrow CaS + O$ $Mg + S \rightarrow MgS$
<i>Agitación</i>	<p>A partir de una inyección de Argón desde la parte inferior de la olla se promueve la agitación del baño metálico. En esta etapa se logra homogenizar química y térmicamente el baño, así como la remoción de las inclusiones del acero.</p>
<i>Vaciado</i>	<p>Por último se realiza el vaciado de la olla en sistemas de alimentación para lingotes o tundish para colada continua.</p>

#### 1.4 Inclusiones y su influencia en las propiedades del acero

Las inclusiones son partículas no metálicas que se incrustan en la matriz de la aleación, de forma general se ha descubierto que dichas inclusiones causan los siguientes efectos sobre las propiedades mecánicas del acero [5] :

- Las propiedades de resistencia al impacto se ven afectadas de manera negativa conforme aumenta la fracción volumen y la longitud de la inclusión.
- La resistencia a la fatiga del acero se reduce ya que las inclusiones generan o incrementan las tensiones o esfuerzos en la matriz y son la principal causa de falla por fatiga.
- El acero ve afectada su trabajabilidad en caliente debido a la baja deformabilidad de las inclusiones, esto quiere decir que la fragilidad aumenta a altas temperaturas de trabajo.
- La anisotropía de una propiedad es causada por la orientación de inclusiones alargadas a lo largo de la dirección del trabajado mecánico.

Existen 3 etapas para la formación de inclusiones [7] :

1.- Nucleación: En esta etapa los núcleos de una nueva fase se forman como resultado de la sobresaturación en el acero, un ejemplo es el aluminio y el oxígeno debido a la disolución de los aditivos de desoxidación que se combinan para que nucleee una partícula de alúmina.

2.- Crecimiento: El crecimiento de una inclusión separada continúa hasta que el equilibrio químico es alcanzado, el crecimiento de las inclusiones en el acero es muy lento.

3.- Coalescencia y aglomeración: El movimiento del acero líquido debido a la convección térmica o la agitación inducida por la inyección de burbujas de argón, causa que las inclusiones sufran fenómenos de colisión entre ellas, esto puede resultar en la coalescencia de estas y/o su aglomeración produciendo aglomerados o clústers. Estos procesos son impulsados por el beneficio energético obtenido a partir de la disminución de la superficie entre la inclusión y el acero líquido.

Las inclusiones de mayor tamaño flotan más rápido que las más pequeñas, dicho fenómeno propicia la absorción de las inclusiones por la fase escoria. El proceso de flotación de inclusiones puede ser intensificado a partir de una agitación moderada por inyección de gas por el fondo. En caso de utilizar una agitación excesiva puede causar la ruptura de las

inclusiones de mayor tamaño en pequeños fragmentos o la desagregación o desaglomeración.

## 1.5 El modelado matemático y físico como herramientas de la Ingeniería de Procesos.

### 1.5.1 Modelos matemáticos.

El modelado matemático se ha convertido en una herramienta fundamental en la investigación científica y la ingeniería. Los modelos matemáticos permiten representar de manera aproximada y analizar sistemas y fenómenos del mundo real a partir del uso de ecuaciones matemáticas y modelos computacionales. El modelado matemático implica la formulación de ecuaciones sobre los fenómenos de transporte que se presentan en un sistema, estas ecuaciones permiten la representación aproximada de la realidad, esto permite predecir la operación, lo cual facilita la toma de decisiones de manera informada sin la necesidad de realizar experimentos que comúnmente conllevan un costo elevado o que simplemente no son posibles de realizar.

Para realizar simulaciones del horno olla es necesario utilizar una diversa gama de modelos, ya que dicho sistema es muestra una alta complejidad ya que existe en él varias fases (acero líquido, escoria líquida, gas inyectado e inclusiones), flujo multifásico turbulento, reacciones químicas, transferencia de masa y energía, entre otros fenómenos. Para el caso del horno olla no encontramos una forma única para representar todos los fenómenos que ocurren en él, sin embargo, se han realizado diferentes modelos para poder resolver sistemas multifásicos. Se han reportado tres acercamientos o aproximaciones. [8]

Modelo cuasimonofásico: El principio clave de este modelo es que las características del penacho, como la fracción de gas, el patrón de velocidad y el diámetro de la pluma de gas, se establecen mediante ecuaciones empíricas. Por lo tanto, la ecuación de fracción de volumen no está acoplada al grupo de ecuaciones a resolver. Este modelo se ha utilizado principalmente para lograr predecir el patrón de flujo en la cuchara, además de que tiene

un bajo gasto computacional. En este modelo no es posible describir el comportamiento de una tercera fase, por lo que la escoria no puede ser simulada con este modelo multifásico.

Modelo de Euler-Lagrange: En este modelo no se trata todo el sistema multifásico como una fase continua, este considera partículas individuales que representan las burbujas o partículas sólidas en movimiento dentro de la ola. Cada una de estas partículas experimenta fuerzas que definen su trayectoria específica y sus velocidades individuales. Las ecuaciones de conservación de momentum y de masa para las fases continuas (acero y escoria) se realizan bajo el marco de referencia Euleriano, mientras que las burbujas de argón que se inyectan al horno se tratan como una fase discreta haciendo uso del Discrete Phase Model donde las trayectorias de estas partículas se describen utilizando un balance de fuerzas bajo el marco de referencia Lagrangiano, de ahí el nombre de este acercamiento multifásico.

Modelo de Euler-Euler: A diferencia del modelo de Euler-Lagrange que se enfoca en el seguimiento de partículas individuales, el modelo Euler-Euler considera todas las fases bajo el marco de referencia de Euler, por lo que se resuelve un set de ecuaciones de conservación para cada fase.

### 1.5.2 Modelos físicos.

El modelo físico busca representar un sistema a menor escala utilizando materiales que permitan visualizar los fenómenos de interés. En la metalurgia las extremas condiciones de trabajo suelen privar el estudio de ciertos fenómenos, algunos de los factores que imposibilitan este tipo de estudios se encuentra desde las temperaturas elevadas, materiales sumamente reactivos y costos de operación. Estas situaciones se presentan en casos como el del presente trabajo en una olla industrial. Es por esto que un modelo físico a partir de materiales como agua y con sistemas hechos de acrílico nos permite observar el comportamiento del fluido y aproximar soluciones a sistemas complejos como los metalúrgicos, considerando además que este tipo de prácticas son viables económicamente por su bajo costo. Los materiales del modelo dependerán de los requisitos y parámetros de cada caso de estudio.

Para poder asegurar que los resultados obtenidos a partir de un modelo físico pueden extrapolarse a sistemas como el horno olla es importante considerar criterios de similitud entre ambos sistemas, estos criterios son:

- Similitud geométrica: Este criterio permite determinar a partir de un factor de escalamiento las dimensiones del modelo físico como la altura y el diámetro para el modelo de la olla. El factor de escalamiento esta dado por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{L_{\text{modelo físico}}}{L_{\text{olla}}}$$

- Similitud dinámica: Teniendo una similitud geométrica, debe existir una relación fija entre fuerzas, esfuerzos, velocidades y aceleraciones. Esto se puede implementar mediante el empleo de uno o varios números adimensionales que contienen las variables que intervienen en el sistema.
- Similitud cinemática: Este criterio permite trabajar con movimientos de fluidos similares entre el modelo físico y el sistema real, en el caso de la olla se trabaja con la siguiente relación:

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

$$v_{\text{acero a } 1600\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v_{\text{agua a } 20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.97 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## 1.6 Estado del arte

Existen gran número de artículos que tocan el tema de simulación por medio de CFD (computational fluid dynamics) sobre las ollas agitadas con gas, estos proyectos tienen una alta variedad de fenómenos, desde procesos de desulfuración, estudio de la transferencia de calor, el comportamiento de las burbujas, el efecto del ojo de la escoria, y por supuesto la remoción de inclusiones. Esta sección muestra algunos de los trabajos y sus avances en la

simulación de remoción de inclusiones, se pondrá especial atención en los modelos que varios grupos de investigadores han implementado y los cuales serán utilizados para el fin de este trabajo.

En el año 2008 Kwon, Zhang y Lee [9] desarrollaron un modelo que consta de dos bloques generales, un bloque para el modelo CFD, y un bloque de modelo de inclusión, nucleación, crecimiento y eliminación. El modelo CFD está establecido en la plataforma de código FLOW-3D Code. Utilizaron el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  para determinar el comportamiento del flujo circulante inducido mediante la inyección de gas que burbujea desde el fondo del horno, además este trabajo se desprecia el efecto de la capa superior de escoria. La superficie libre de la masa fundida se trazó por medio de la técnica VOF. Este modelo permite acoplar campos de flujo transitorios y campos de temperatura con campos de concentración de elementos e inclusiones. Aunque con este modelo antiguo se lograron obtener distribuciones de tamaño de inclusión dependientes del tiempo y de la posición, estos resultados muestran una buena consistencia con respecto a los datos recopilados en condiciones industriales. De esta forma se determinó que la eliminación de las inclusiones se puede describir como la agregación de partículas de pequeño tamaño en aglomerados que finalmente son eliminados mediante la flotación o sedimentación.

Felice et al. [10] utilizando la herramienta computacional Ansys Fluent desarrollaron una simulación utilizando un modelo CFD distinto. Ellos se decidieron por el modelo Euler-Euler, el cual permite calcular el transporte de la inclusión junto con la ecuación de equilibrio poblacional sin realizar ningún tipo de operación de post-procesamiento, de esta forma la fase gas se rige por un conjunto de ecuaciones de transporte similares a las aplicadas a la fase continua (líquido). Se añadieron interacción entre el acero líquido y el gas inyectado tales como la fuerza de arrastre, elevación y dispersión turbulenta, además de que el modelo utilizado para las inclusiones añadió mecanismos de aglomeración y eliminación (flotación, sedimentación y atrapamiento en la superficie libre) junto con el transporte convectivo de inclusiones en el interior del acero fundido.

Huang et al. [11] en el año 2013 formularon un modelo Euler-Euler para la multifase (acero líquido y gas argón) mientras que las trayectorias de inclusión se calcularon utilizando el modelo de fase discreta (DPM), que resuelve una ecuación de transporte para cada partícula. Este modelo fue utilizado para determinar el comportamiento de las inclusiones provenientes de la erosión del refractario del horno. Se determinó que un soplado doble, a diferencia de un soplado simple causará una mayor erosión severa en el revestimiento del horno, generando un mayor número de inclusiones en el sistema.

Con estos primeros 3 trabajos observamos las herramientas que se pueden ocupar para simular de forma eficiente, la variedad de modelos permite realizar una misma tarea de distintas maneras utilizando diferente combinación de modelos, sin embargo, a partir de ahora el resto de trabajos muestra una tendencia a utilizar el modelo Euler-Euler para la dinámica de fluidos, además de añadir una nueva herramienta computacional para determinar el comportamiento de poblaciones mediante el modelo de balance de población (PBM).

En el año 2013, Lou y Zhu [12] realizaron una simulación mediante un acoplamiento CFD-PBM y utilizando funciones definidas por el usuario (UDF) para realizar el procedimiento. Para el comportamiento de la pluma de gas se modificó el modelo de turbulencia con términos adicionales para considerar el efecto de las burbujas en la turbulencia. Para el comportamiento de las inclusiones se consideraron fenómenos novedosos en este tipo de simulaciones, tales como el movimiento aleatorio turbulento de las inclusiones, estela de burbujas y formación del ojo de la escoria en la superficie del acero líquido. Por otra parte, se añadieron mecanismos por los cuales las inclusiones promueven su crecimiento debido a la colisión entre inclusión-inclusión, entre estos mecanismos se encuentran la colisión aleatoria turbulenta. También fueron añadidos mecanismos de colisión de inclusión-burbuja tales como la captura de estela de burbujas y la colisión de flotabilidad con inclusión de burbujas.

Este trabajo da la pauta a la utilidad que tiene el PBM en la simulación de la remoción de inclusiones, sin embargo, esto no es una tarea sencilla debido a la alta presencia de

fenómenos complejos y relacionados con la turbulencia en el horno, ya que se agregaron tres mecanismos de crecimiento de la inclusión y seis mecanismos de remoción, todos estos mecanismos teniendo que ser agregados mediante código de programación (UDF) compatible con Ansys Fluent.

Xu et al. [13] estudiaron en 2016 el mecanismo de eliminación de inclusiones debido a una estela de burbujas. Se utilizó un modelo de agua y un modelo numérico tridimensional. En los experimentos se utilizó una cámara de alta velocidad para registrar el movimiento de las burbujas y el comportamiento de inclusión relacionado con el flujo. En el modelo numérico, la dinámica de fluidos inducida por burbujas en el líquido se simuló utilizando el método del volumen de fluido (VOF). Además, el movimiento de las partículas individuales fue seguido por el modelo de fase discreta (DPM). La trayectoria de una partícula individual se calcula integrando las fuerzas sobre la partícula dentro de un marco de referencia de Lagrange. Este estudio demuestra que la dificultad de que una inclusión sea eliminada aumenta conforme disminuye el tamaño de las inclusiones.

Cao y Nastac [14] desarrollaron un enfoque para predecir el flujo multifásico, las características de la interfaz escoria-acero y la remoción de inclusiones, teniendo en cuenta la capa superior de escoria fluctuante. Los resultados de este estudio indican que la captura de escoria es el mecanismo predominante para la remoción de inclusiones, por otra parte, la tasa de eliminación de inclusiones por adherencia a la pared es bastante baja.

Wang et al. [15] indican que la coalescencia de inclusiones se puede dividir en 2 pasos. Primero las inclusiones se acercan y chocan bajo la acción de fuerzas impulsoras de agregación, después estas inclusiones superan las fuerzas externas para completar el comportamiento de agregación. Estos 2 pasos se describen mediante la frecuencia de colisión y el coeficiente de agregación efectivo. El estudio muestra que el aumento en el flujo de argón también aumenta el comportamiento de crecimiento por agregación de las inclusiones, lo que permite una mayor tasa de remoción de estas.

Estos trabajos demuestran que independientemente de los modelos utilizados que se utilicen es posible realizar una simulación que tenga similitud a la realidad sobre la remoción

de inclusiones en un horno olla agitado con inyección de gas. En la **Tabla 2** se muestra un resumen de los artículos tratados en esta sección, mostrando los modelos utilizados y ciertas simplificaciones realizadas en dichos casos, así como el software utilizado para correr estas simulaciones que en su gran mayoría utilizan Ansys Fluent, el mismo software utilizado para el presente trabajo.

*Tabla 2 Resumen de los trabajos relacionados con la remoción de inclusiones.*

<i>Año</i>	<i>Artículo</i>	<i>Modelo CFD</i>	<i>Modelo de Turbulencia</i>	<i>Inclusiones</i>	<i>Anotaciones</i>	<i>Software</i>
2008	A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation [9] .	Euler-Lagrange	Modelo k-ε	Se trataron inclusiones utilizando nucleación homogénea y crecimiento por difusión.	Desprecia el efecto de la escoria sobre el acero líquido, trabaja en un modelo 2D.	FLOW-3D Code
2012	Numerical Modelling of Inclusion Behaviour in a Gas-stirred Ladle [10] .	Euler-Euler	Modelo k- ε Standar	Las inclusiones con tratadas utilizando una ecuación de balance de población (PBE).	Desprecia el efecto de la escoria sobre el acero líquido, en un modelo 2D utiliza la implementación de UDF.	Ansys Fluent
2013	Mathematical Modeling on Erosion Characteristics of Refining Ladle Lining with Application of Purging Plug [11] .	Euler-Euler	Modelo k- ε Standar	Las inclusiones eran provenientes de la erosión del horno y sus trayectorias fueron calculadas con un DPM.	Se consideró un sistema con escoria, y el modelo resolvió una geometría en 3 dimensiones.	Ansys Fluent
2013	Numerical Simulations of Inclusion Behavior in Gas-Stirred Ladles [12] .	Euler-Euler	Modelo k- ε modificado	Se consideraron los fenómenos de movimiento aleatorio turbulento de las inclusiones, estela de burbujas y formación de ojos de escoria en la superficie del acero fundido (PBM)	Se desprecia el efecto de la escoria, las inclusiones y burbujas se suponen con diámetro constante y se trabaja en 3 dimensiones.	Ansys Fluent
2016	A Numerical Study about the Influence of a Bubble Wake Flow on the	Euler-Lagrange	Laminar	Las inclusiones son estudiadas mediante el modelo DPM	No se considera la presencia de escoria, el fluido se encuentra en estado laminar y la	Ansys Fluent

	Removal of Inclusions [13] .				simulación se realiza en 3 dimensiones.	
2018	CFD Modeling of Transport Phenomena and Inclusion Removal in a Gas-Stirred Ladle [14] .	Euler-Lagrange	Acoplamiento de turbulencia bidireccional	Se utilizó el método DPM para calcular la trayectoria tanto de las burbujas como de las inclusiones.	Se considera el efecto de la escoria; problema en 3 dimensiones.	Ansys Fluent
2022	Numerical simulation of inclusion coagulation during soft blowing process of ladle furnace [15] .	Euler-Euler	Modelo k- ε modificado	Las inclusiones son tratadas utilizando un modelo de balance de población (PBM).	Se ignora la interacción entre las burbujas de argón y las inclusiones, se considera una superficie plana y libre en la superficie superior.	Ansys Fluent

## 1.7 Hipótesis

Usando los algoritmos numéricos DPM-Euler-k-épsilon realizable que describen el flujo de fluidos en una olla agitada con gas servirá para implementar un modelo población de partículas y calcular la dinámica de los tamaños poblacionales y la cinética de remoción de inclusiones.

## 1.8 Objetivos

- **Objetivo General:** Implementar un modelo de población de tamaños de partículas para calcular la dinámica poblacional y la cinética de remoción de inclusiones en un modelo matemático de una olla de acero con inyección de gas céntrica en 2D usando los algoritmos DPM-Euler-k-épsilon realizable del software Fluent-Ansys.
- **Objetivo particular 1:** Implementar el modelo poblacional de tamaños de inclusiones (partículas) en ollas de acero agitadas con inyección de gas céntrica 2D empleando el algoritmo DPM-Euler- k-épsilon realizable.

- Objetivo particular 2: Con el apoyo del modelo matemático determinar la evolución de la población de partículas y su cinética de remoción.

## 2. Metodología

### 2.1 Suposiciones

Este trabajo busca sentar bases dentro del grupo de trabajo para lograr simular con el paso del tiempo de forma más exacta el fenómeno de cinética de remoción de inclusiones en el proceso de refinación secundaria utilizando el horno olla, por lo que no se busca competir contra las simulaciones ya realizadas por numerosos equipos de investigadores a lo largo del mundo. Es por esto que el cálculo realizado considera las siguientes suposiciones:

- Las simulaciones serán realizadas con la geometría de un modelo físico utilizando agua en lugar del acero y aire en lugar de burbujas de argón. Para las inclusiones se utiliza polimetilmetacrilato.
- Los fluidos presentes en el problema se consideran newtonianos e incompresibles.
- La simulación utiliza modelo Euleriano para la fase continua (agua y aire inyectado) y modelo de fase discreta para las inclusiones.
- El problema se resuelve en 2 dimensiones, además al tener inyección céntrica de gas se considera un eje de simetría en el punto de inyección por lo que solo se resuelve la mitad del sistema disminuyendo el gasto computacional.
- Superficie libre plana, esto quiere decir que no se considera la presencia de escoria ni aire dentro del sistema, además de que se desprecia la deformación de la superficie del baño causada por la inyección de aire.
- Las inclusiones se agregan a partir de una inyección de partículas discretas, esto debido a la naturaleza del modelo de fase discreta utilizado, se dará un minuto de homogeneización para el sistema en donde la condición de escape de las inclusiones

no estará activa, después de este tiempo la condición es activada y comenzará la remoción.

- Se considera que tanto las burbujas como las inclusiones son esféricas y con un diámetro constante, además se desprecia el fenómeno de coalescencia entre ellas.
- Se desprecia la transferencia de calor en el sistema, por lo que no es necesario resolver la ecuación de conservación de energía.
- Se realizarán 3 simulaciones utilizando un solo diámetro de inclusiones (20 micras), este servirá para observar el efecto del flujo inyectado en el sistema sobre la remoción de las inclusiones. Una prueba más será realizada utilizando una distribución de tamaños de inclusión (4 a 50 micras) [16] , esto para observar el efecto del tamaño de inclusión.
- Se utiliza el modelo k- ε para la turbulencia en el sistema, por lo que el régimen se trabaja como turbulento.

## 2.2 Ecuaciones Gobernantes

### 2.2.1 Ecuación de fracción volumen.

El volumen de la fase  $q$ ,  $V_q$  está dado por la integral de volumen:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $\alpha_q$  es la fracción volumen de la fase  $q$ , la suma de la fracción volumen de todas las fases debe ser igual a uno.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \dots \dots \dots (2)$$

### 2.2.2 Ecuación de continuidad.

Para un fluido incompresible la ecuación de continuidad para cada fase es:

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

Donde  $\rho_q, \vec{v}_q$  son la densidad y el vector velocidad de la fase q respectivamente.

### 2.2.3 Ecuación de transporte de momentum.

La ecuación para cada fase q es:

$$\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_q \mu_{ef,q} (\nabla \vec{v}_q + (\nabla \vec{v}_q)^T)) + \alpha_q \rho_q \vec{g} \dots \dots \dots (4)$$

Donde  $\mu_{ef,q}$  para la fase líquida es:

$$\mu_{ef,q} = \mu_{l,l} + \mu_{t,l} \dots \dots \dots (5)$$

Para el resto de las fases:

$$\mu_{ef,q} = \mu_{l,q} \dots \dots \dots (6)$$

Donde P es la presión,  $\mu_{ef,q}$  es la viscosidad efectiva para cada fase y  $\vec{g}$  es la aceleración de la gravedad. Para la viscosidad efectiva encontramos 2 términos:  $\mu_{l,l}$  y  $\mu_{t,l}$  que son la viscosidad molecular del líquido y la viscosidad turbulenta del líquido definida dependiendo del modelo de turbulencia que sea utilizado. Este término solo afectará al fluido principal que en nuestro caso es el agua.

### 2.2.4 Modelo k-ε realizable.

Este modelo es el encargado de resolver una ecuación de conservación para la energía cinética turbulenta k y una segunda ecuación de conservación para la rapidez de disipación de energía cinética turbulenta ε [17] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \dots \dots \dots (9)$$

$k$  es la energía cinética turbulenta,  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta,  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de Prandtl,  $G_k$  es un término de generación de  $k$  por efecto del gradiente de la velocidad media de la fase continua,  $\varepsilon$  es la rapidez de dispersión de energía cinética turbulenta,  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $C_2$  y  $C_{1\varepsilon}$  son constantes del modelo. Las constantes utilizadas y sus valores se muestran a continuación:

$$C_2 = 1.9 \qquad \sigma_k = 1.0 \qquad \sigma_\varepsilon = 1.2 \dots \dots \dots (10, 11, 12)$$

La condición de Realizable se aplica al tratar  $C_\mu$  variable en lugar de constante al hacer el cálculo de la viscosidad turbulenta,  $\mu_t$ .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots \dots \dots (13)$$

Donde  $C_\mu$  es un coeficiente del modelo, dependiente de los parámetros  $A_0, A_s$  y  $U^*$ :

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

$$A_0 = 4.04 \dots \dots \dots (15)$$

$$A_s = \sqrt{6} \left( \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \sqrt{6} \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\sqrt{S_{ij}S_{ij}}} \right) \right) \dots \dots \dots (16)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \dots \dots \dots (17)$$

En esta ecuación  $S_{ij}$  es el tensor de rapidez de deformación:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \dots \dots \dots (18)$$

$G_b$  es la generación de energía cinética turbulenta como producto de la fuerza boyante:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \dots \dots \dots (19)$$

donde  $Pr_t$  es el número de Prandtl para energía y  $g_i$  es el componente de la aceleración gravitacional en la dirección  $i$ . El coeficiente de expansión térmica,  $\beta$ , se define como:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \dots \dots \dots (20)$$

donde  $p$  es la presión local.

### 2.2.5 Modelo de Fase Discreta.

El movimiento y remoción de las inclusiones se resolvió utilizando el modelo de fase discreta (DPM) el cual se basa en la segunda ley de Newton. En donde se realiza un balance de fuerzas que actúan sobre la partícula.

$$\frac{dU_p}{dt} = T_D (\overline{U_{fP}} - \overline{U_p}) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho_{fP})}{\rho_p} + \overline{F_x} \dots \dots \dots (21)$$

Donde  $\overline{U_p}$  representa la velocidad de la partícula,  $T_D$  representa el término de arrastre de la partícula,  $\overline{U_{fP}}$  es la velocidad de la fase continua,  $\vec{g}$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho_p$  y  $\rho_{fP}$  son la densidad de la inclusión y de la fase continua y  $\overline{F_x}$  es el factor que considera fuerzas adicionales.

En este trabajo se consideran las fuerzas de arrastre, la fuerza de cuerpo gravitacional y la fuerza boyante, las cuales están representadas en la ecuación 21, sin embargo, se desprecian las fuerzas de masa virtual y de empuje.

El término de arrastre para las inclusiones está dado por el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds de la partícula.

$$T_D = \frac{18\mu_{fp} C_D Re}{\rho_p d_p^2} \dots\dots\dots (22)$$

Donde  $\mu_{fp}$  es la viscosidad dinámica de la fase continua,  $C_D$  representa el coeficiente de arrastre,  $d_p$  se considera como el diámetro de la partícula y el número de Reynolds relativo de la partícula es representado como  $Re$ .

Para el coeficiente de arrastre se utilizó el modelo esférico, el cual considera la totalidad de los volúmenes de partícula como esféricos y está dado por:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \dots\dots\dots (23)$$

Donde  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son constantes empíricas del modelo.

### 2.3 Condiciones iniciales y de frontera.

El problema considera las dimensiones de un modelo físico, de esta forma la olla de acero logra ser representada mediante la similitud dinámica y geométrica del modelo. El sistema del modelo físico tiene dimensiones que fueron obtenidas a partir de un escalamiento de factor 1/17 de horno olla de 140 toneladas, estos parámetros fueron obtenidos previamente

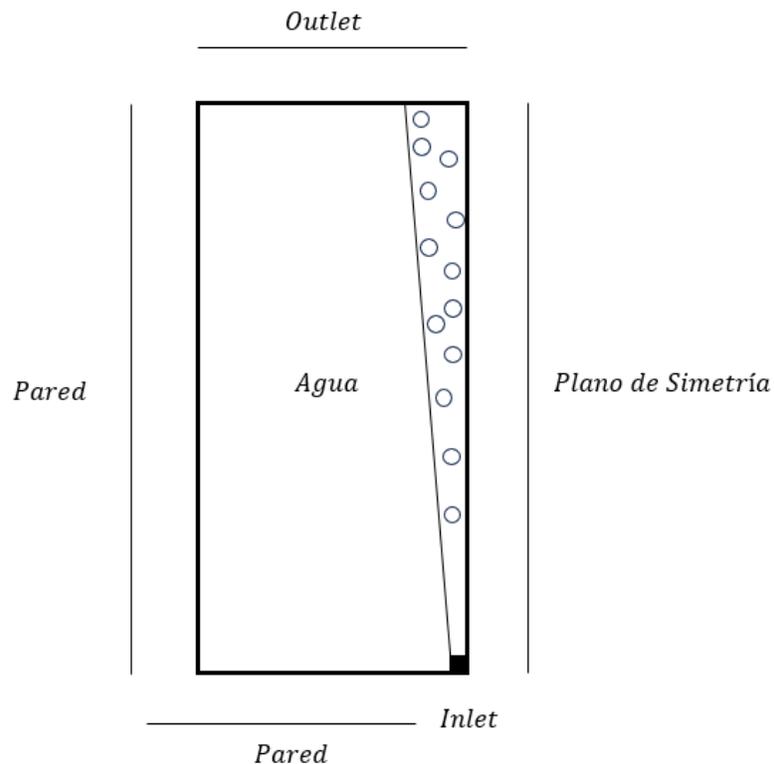
por López [18] , el cual llevó a cabo el cálculo de los criterios de similitud previamente mencionados. Las dimensiones del modelo se muestran en la **Tabla 3**.

*Tabla 3 Dimensiones del modelo físico y el prototipo de horno olla a escala 1/17.*

<i>Sistema</i>	<i>Altura del Modelo [m]</i>	<i>Radio del Modelo [m]</i>	<i>Diámetro de la inyección de gas [m]</i>	<i>Altura del baño [m]</i>
<i>Modelo Físico</i>	0.219	0.0945	0.005	0.1648
<i>Horno olla</i>	3.736	2.226	-	2.8016

La similitud cinemática se considera a partir de la viscosidad cinemática del acero y del agua, los cuales tienen un valor muy similar de dicha propiedad, el cual es de  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En la **Figura 4** se muestran las fronteras presentes en el sistema, además en la **Tabla 4** se muestra la condición utilizada en cada frontera.



*Figura 4 Esquema del modelo y sus fronteras. (Utilizada en el modelo 2D).*

Tabla 4 Condiciones de frontera.

<i>Frontera</i>	<i>Condición de frontera</i>	<i>Condición para el DPM</i>
<i>Outlet</i>	Salida de Presión	Condición de la primera etapa: Reflect. Condición de la segunda etapa: Escape.
<i>Inlet</i>	Inyección de aire	Reflect
<i>Pared</i>	Pared impermeable fija	Reflect.
<i>Eje de Simetría</i>	Eje axisimétrico	Eje axisimétrico

La condición “Reflect” utilizada para el modelo DPM permite que las partículas discretas coquen y “reboten” contra la frontera sin que haya algún otro tipo de interacción entre ellas, en todas las fronteras se coloca esta condición durante toda la simulación, con la excepción del outlet, en donde después de los primeros 60 segundos de simulación que se utilizan para homogenizar el baño es activada la condición “Escape” la cual elimina la partícula discreta al entrar en contacto con dicha frontera, esto siendo una simplificación al mecanismo de remoción de inclusiones, en donde se supone una absorción ideal de la inclusión por parte de la escoria.

El inlet se considera de tipo “mass flow inlet”, el cual nos permite especificar el flujo en kilogramos de aire por segundo que se inyectarán desde dicha frontera. Se utilizaron 3 flujos distintos de inyección, estos se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5 Condiciones de flujo para las 4 pruebas a diámetro de inclusión constante.

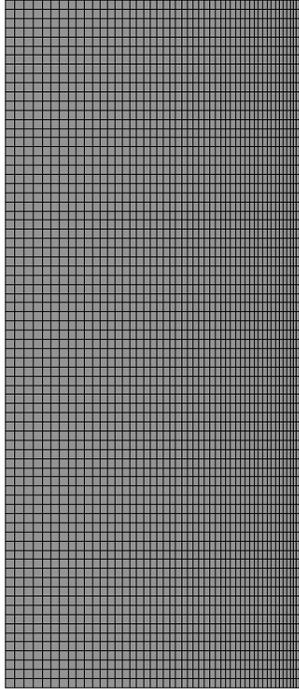
<i>Prueba</i>	<i>Flujo de aire inyectado [kg/s]</i>
1 ( <i>Flujo Bajo</i> )	$6.2 \times 10^{-6}$
2 ( <i>Flujo Medio</i> )	$9.3 \times 10^{-6}$
3 ( <i>Flujo Alto</i> )	$1.24 \times 10^{-5}$

Estos flujos darán una idea del efecto que tiene la cantidad de aire inyectado sobre la remoción de inclusiones, así como las velocidades alcanzadas por el fluido en el sistema.

Las pruebas 1, 2 y 3 se realizaron utilizando un único tamaño de inclusión de 20 micras, tomando este valor como un valor promedio, ya que en el horno olla es posible encontrar inclusiones desde las 4 micras, hasta los 50 micrómetros. La prueba 4 se realizó tomando este intervalo de tamaños, con una distribución de diámetros de Rosin-Rammler, generando 6 tamaños de inclusión en este rango.

#### 2.4 Procedimiento de Solución.

La resolución del modelo matemático se realizó utilizando el software CFD ANSYS FLUENT® en su versión 2020 R2. El equipo de cómputo utilizado cuenta con un procesador Intel Core i5, 32 núcleos físicos y 12 GB de memoria RAM. El tiempo de cómputo por caso ascendía a los dos días.



Nodos: 3876

Elementos: 3750

Aspect Ratio Promedio: 1.61

Orthogonal Quality: 1

*Figura 5 Estadísticas de la malla.*

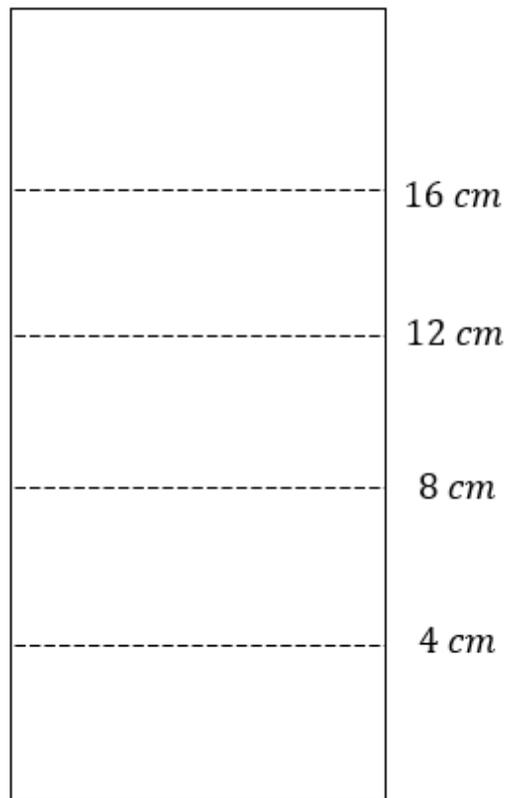
La malla utilizada (ver Figura 5) consta de 3750 elementos, se realizó un refinamiento en la zona de inyección, al no tener más fases no se realizó ninguna refinación de la malla por interfaces.

### 3. Resultados y Análisis

#### 3.1 Validación

Para poder validar la simulación realizada es necesario una comparación entre los resultados obtenidos con el modelo matemático y datos recabados de procesos experimentales. López [18] en su trabajo “modelado físico y matemático de intercambios metal/escoria en ollas de acero agitadas con gas” presentó resultados de perfiles de velocidad y energía cinética

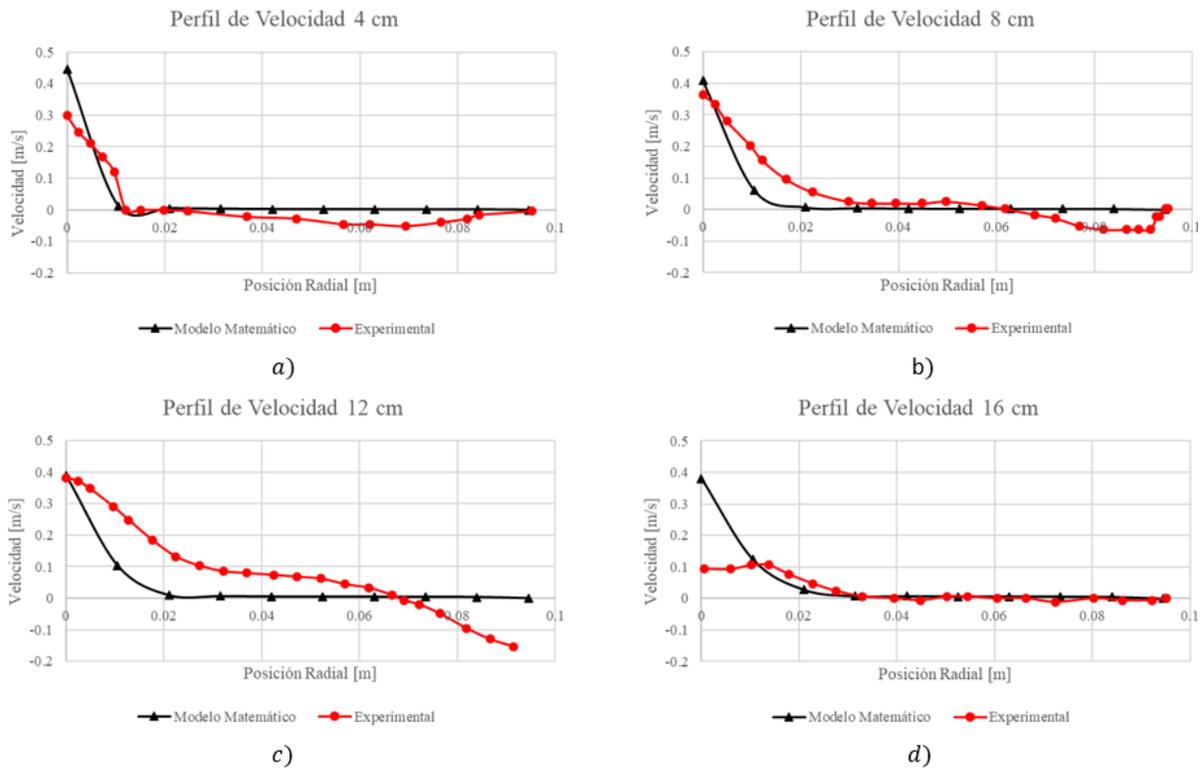
turbulenta del agua en varias alturas a lo largo de la posición radial de la olla. Con la herramienta de post-procesamiento en Ansys Fluent se obtuvieron perfiles para el modelo matemático del presente trabajo, estos perfiles fueron tomados a 4, 8, 12 y 16 centímetros de altura, se representa en la **Figura 6** un esquema de dicho sistema:



*Figura 6 Posición de los perfiles de velocidad considerados para la validación.*

En las gráficas obtenidas la posición correspondiente al cero es el eje axisimétrico o el eje de inyección del aire, mientras que el otro extremo es la pared del modelo.

En la **Figura 7** podemos observar que los perfiles registrados por la simulación (líneas y símbolos negros) a cuatro y ocho centímetros de altura muestran un comportamiento muy apegado a los valores experimentales (líneas y símbolos rojos), teniendo una caída de velocidad repentina conforme nos alejamos del centro del modelo, esto es congruente, ya que al centro encontramos la inyección de aire, la cual dotará de agitación a nuestro sistema alcanzando la mayor velocidad en dicho eje de inyección.

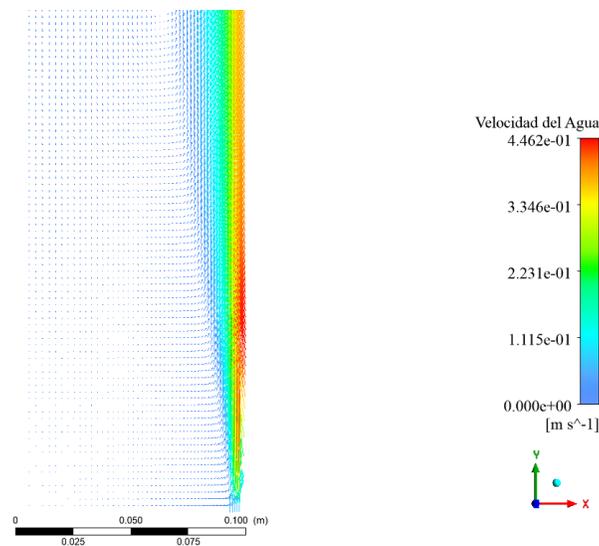


*Figura 7 Comparación de los perfiles de velocidad axial predichos por el modelo matemático y la practica experimental.*

Es posible diferenciar dos zonas distintivas en todos los gráficos de la **Figura 7**, la primera zona corresponde a la zona de inyección y el alcance de las burbujas de aire, esta zona va desde el centro del modelo y se extiende por los primeros 0.02 metros, en dicha zona el modelo matemático arroja una disminución lineal de la velocidad axial, para el perfil a cuatro centímetros la disminución de velocidad ocurre a una menor distancia desde el centro y esta disminución de velocidad se ve afectada por la altura del perfil, ya que al aumentar dicha variable la tendencia de velocidad arroja una mayor zona de alcance, esto puede explicarse debido a la apertura que sufre la pluma de gas conforme sube en el modelo. La segunda zona comienza justo al terminar la disminución de la velocidad, esta zona de estudio en las gráficas muestra en la mayoría de los perfiles velocidades muy similares, por lo que en estas partes la simulación predice el flujo de una manera muy cercana a la realidad, solo en el perfil de los 12 centímetros encontramos velocidades significativamente menores. De igual forma la diferencia que se observa en el perfil de

velocidades a 16 centímetros se debe a la condición de superficie libre plana utilizada, ya que de forma experimental muy cerca de esa altura tenemos la interfase agua- aire, la cual se deforma disipando parte de la energía cinética en energía de deformación, teniendo una caída en el valor de velocidad en esa zona.

Con ayuda de los vectores de velocidad (**Figura 8** y **Figura 9** para flujo bajo y medio de gas respectivamente) se logra observar la distribución de velocidades que toma el agua al llegar a un estado estable para la fluidodinámica, de esta forma en la parte inferior del sistema se forman zonas muertas, en donde el agua tiene una velocidad tan baja que es probable que las inclusiones de esta zona sean difícilmente removidas o en o en otras palabras puede existir acumulación de estas partículas.



*Figura 8 Vectores de velocidad del agua para el flujo bajo de inyección.*

Estos vectores de velocidad nos permiten ver de forma más clara los resultados presentados por los perfiles de la **Figura 7**, donde las velocidades más bajas en todo el sistema se pueden encontrar a menores alturas y cuando nos alejamos del eje de inyección, esto sucede para los 3 flujos utilizados, observamos que la inyección de un mayor flujo de aire también dotara al sistema de una mayor velocidad debido a la presencia de burbujas de aire que generan fuerzas de arrastre hacia el fluido.

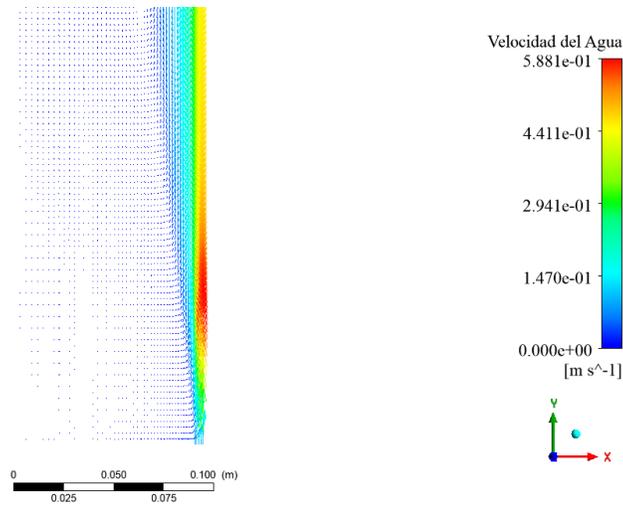
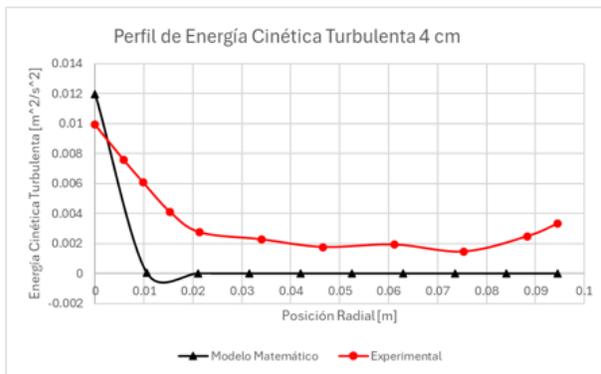
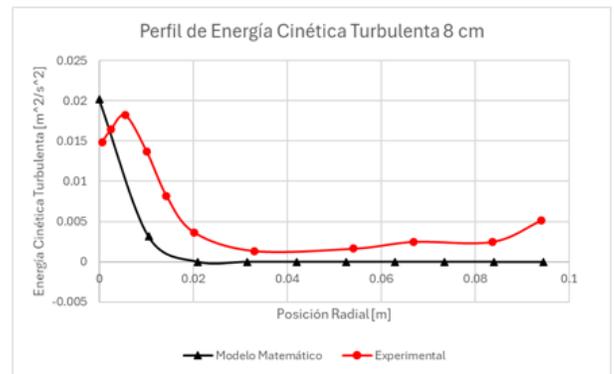


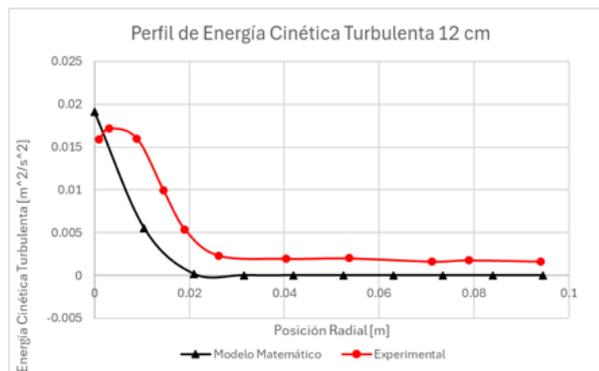
Figura 9 Vectores de velocidad del agua para el flujo medio de inyección.



a)



b)



c)

Figura 10 Comparación de los perfiles de energía cinética turbulenta predichos por el modelo matemático y la práctica experimental.

En cuanto a la comparación de energía cinética turbulenta presentada en la **Figura 10**, se observa una tendencia muy similar entre los perfiles experimentales (líneas y símbolos rojos) y los generados a partir del modelo matemático (líneas y símbolos negros), con una ligera sobreestimación por parte de la simulación.

Dado que los valores comparados en las **Figuras 7 y 10** muestran el mismo orden de magnitud en las propiedades medidas, además del análisis donde se observa una clara similitud en el comportamiento de las curvas, se considera que el modelo es validado y se procedió a correr las simulaciones correspondientes a la remoción de inclusiones.

### 3.2 Resultados de la remoción de inclusiones (Prueba para los 3 flujos).

El proceso de cálculo para la remoción de inclusiones se dividió en 3 distintas etapas de cálculo:

1. Inyección de las inclusiones: A partir del modelo DPM se realiza la inyección de partículas discretas al sistema.
- 2.- Mezclado y homogeneizado de las inclusiones: Se realizó una etapa de mezclado de las partículas inyectadas previamente, ya que después de realizar la inyección las partículas no se distribuían de forma homogénea en el baño.
- 3.- Remoción de las Inclusiones: Una vez se tiene un baño con una distribución homogénea de las inclusiones, se activa la condición de escape en el outlet para la fase discreta, se consideraron 80 segundos de remoción, obteniendo los resultados mostrados a continuación.

## Remoción de Inclusiones

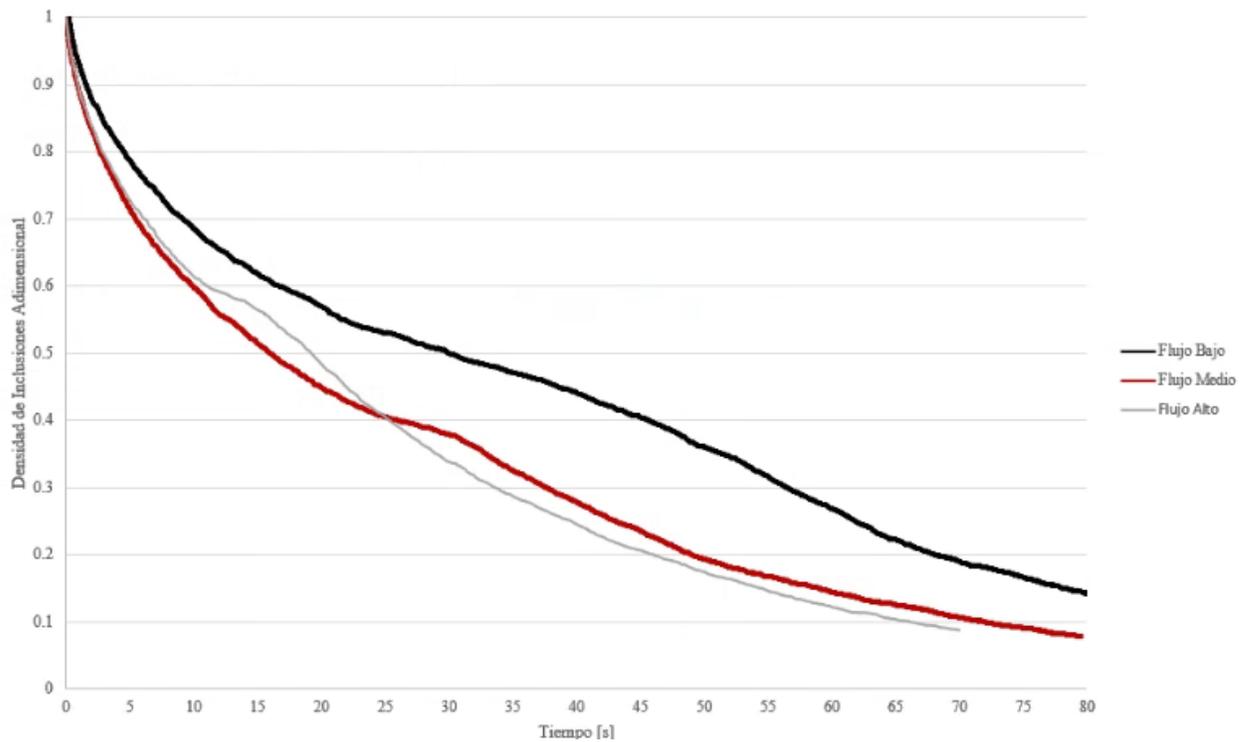


Figura 11 Gráfica de remoción de inclusiones, densidad de inclusiones adimensional contra el tiempo de remoción (Diámetro de inclusión 20 micras).

La **Figura 11** muestra la evolución de la concentración de inclusiones con el paso de tiempo, se muestran las curvas de remoción para los 3 flujos trabajados, es esta manera logramos observar una tendencia, al elevar el flujo de aire inyectado la remoción de inclusiones es más rápida. Esto es muy claro al comparar el flujo bajo con el medio, en donde la diferencia es evidente a simple vista, ya que para eliminar el 50% de las inclusiones presentes con el flujo bajo tomaría un poco más de 30 segundos, mientras que el flujo medio reduce este tiempo a la mitad, 15 segundos son suficientes para remover cerca del 50% de las inclusiones presentes en el sistema. Ahora bien, entre estos 2 flujos esta diferencia continua durante toda la curva, sin embargo, al comparar el flujo medio con el flujo alto encontramos ciertas peculiaridades. Al inicio de la remoción y hasta los primeros 10 segundos la eliminación de inclusiones es prácticamente idéntica, incluso en un punto en donde la curva parece cambiar el control de la remoción la curva del flujo medio remueve más inclusiones, al llegar a los 25 segundos la curva del flujo alto recupera su tendencia y supera en cuanto

a velocidad de eliminación de inclusiones se refiere, y así continua hasta el fin de ambas curvas. Es de importancia recalcar que esta diferencia en la velocidad de eliminación no es tan grande en comparación entre los 2 primeros flujos, por lo que el flujo medio podría ser considerado como el ideal para remover las inclusiones en este sistema en específico. Se muestran en la **Tabla 6** las ecuaciones obtenidas a partir de regresiones exponenciales de cada una de las curvas.

*Tabla 6 Ecuaciones correspondientes de las regresiones exponenciales de las curvas de remoción de inclusiones*

	<i>Ecuación de la curva</i>	<i>Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)</i>
<i>Flujo Bajo</i>	$y = 0.9745e^{-0.023x}$	R <sup>2</sup> = 0.9726
<i>Flujo Medio</i>	$y = 0.8492e^{-0.029x}$	R <sup>2</sup> = 0.9898
<i>Flujo Alto</i>	$y = 0.9044e^{-0.033x}$	R <sup>2</sup> = 0.9951

En la **Tabla 6** las correlaciones de las ecuaciones ajustadas son razonables. E cuanto a los valores de las ecuaciones mostradas en dicha tabla, corresponden a cinéticas de primer orden cuya forma matemática son una exponencial negativa de la variable “Y” que es la densidad de inclusiones adimensional con la variable “X” que representa al tiempo de remoción en segundos. En este tipo de cinéticas de primer orden el término preexponencial no es tan importante como el valor negativo dentro de la exponencial. Un valor mayor negativo indica una cinética más rápida. Se nota que con flujo bajo la cinética es más lenta, seguida del flujo medio y la más rápida remoción se da a flujo alto.

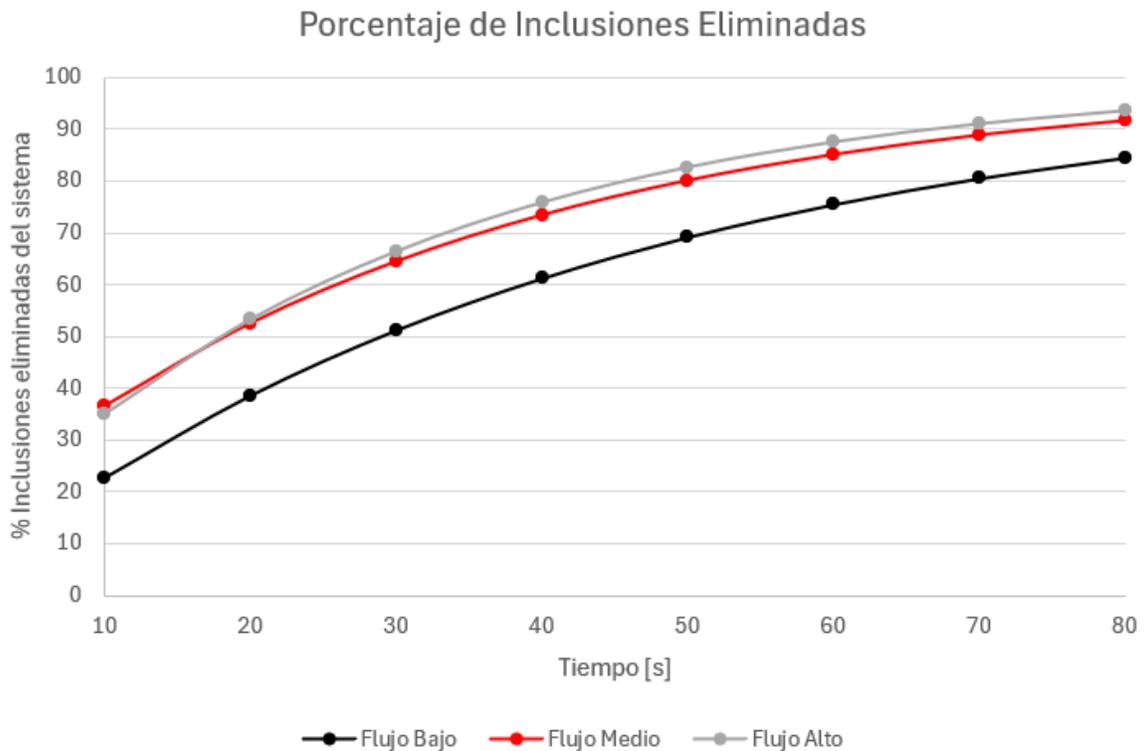
Con esta información es sencillo calcular un valor aproximado para el porcentaje de remoción de inclusiones, de esta forma permitiendo tener una comparación cuantitativa de las curvas de remoción mostradas en la **Figura 11**. Estos valores se resumen en la **Tabla 7** donde encontramos valores para los 3 flujos de inyección de aire utilizados.

*Tabla 7 Porcentaje de inclusiones eliminadas en el sistema a diferentes tiempos de remoción.*

**% Porcentaje de inclusiones eliminadas del sistema**

<i>Tiempo [s]</i>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>
<i>Flujo Bajo</i>	22.53	38.45	51.10	61.14	69.13	75.47	80.51	84.52
<i>Flujo Medio</i>	36.46	52.45	64.42	73.38	80.08	85.09	88.85	91.65
<i>Flujo Alto</i>	34.98	53.26	66.39	75.84	82.63	87.51	91.02	93.55

El porcentaje de inclusiones removidas en el sistema por el flujo bajo es con diferencia el más bajo, esto se ejemplifica en la **Figura 12**, en donde se grafican los porcentajes acumulados de partículas removidas en función del tiempo de inyección de gas.



*Figura 12 Comparación en el porcentaje de inclusiones removidas por los 3 flujos de inyección*

Para lograr observar de una manera más sencilla el proceso de remoción, se obtuvieron contornos de concentración para los tres flujos utilizados, estos contornos muestran en color rojo las zonas con un mayor número de inclusiones. Estos contornos fueron tomados a 0, 20, 40, 60 y 80 segundos, y se muestra una comparación para todos los flujos y para cada tiempo mencionado dentro de las **Figuras 13, 14, 15, 16 y 17**.

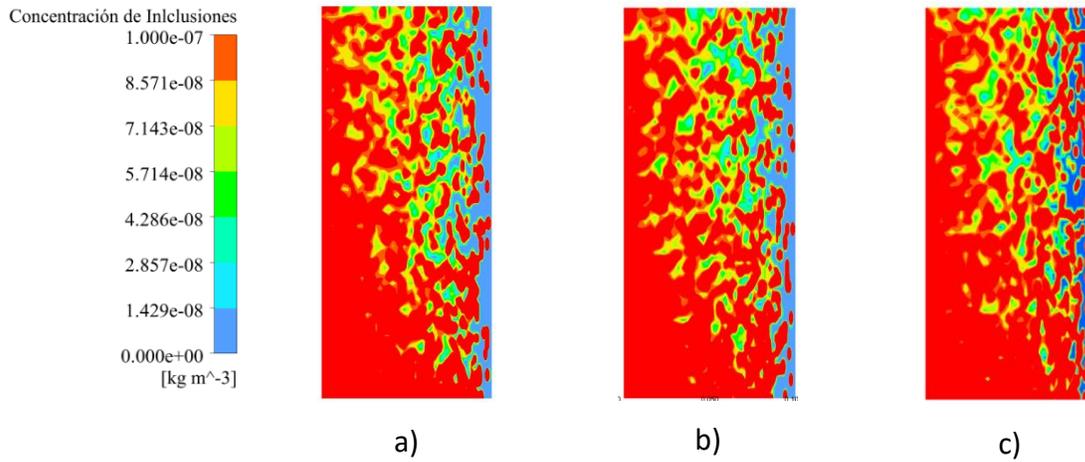


Figura 13 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 0 segundos de remoción  
 a) flujo bajo, b) flujo medio, c) flujo alto.

De forma inicial (**Figura 13**) se observa una distribución de inclusiones muy parecida y en todo el dominio, con la excepción de la zona del eje de inyección, donde se observa una baja concentración de dichas inclusiones, esto se debe a la etapa previa de mezclado en el sistema.

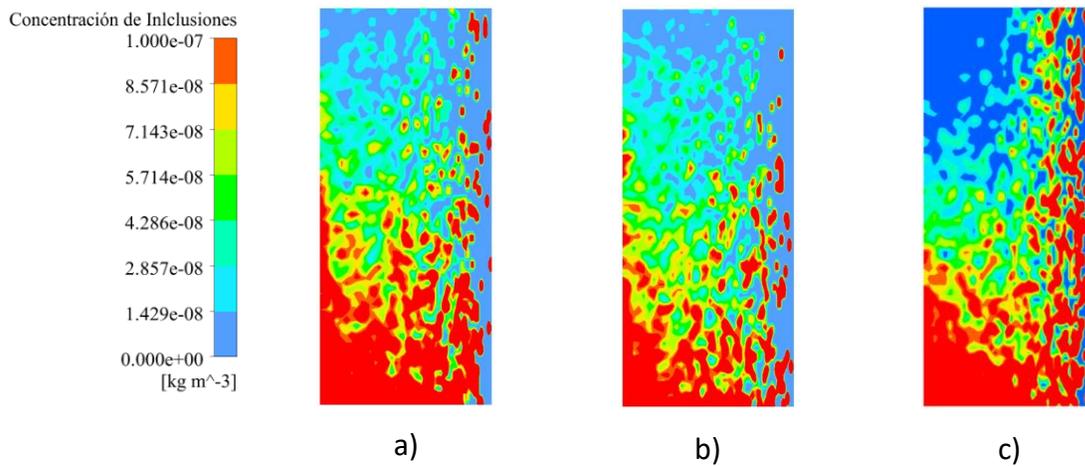
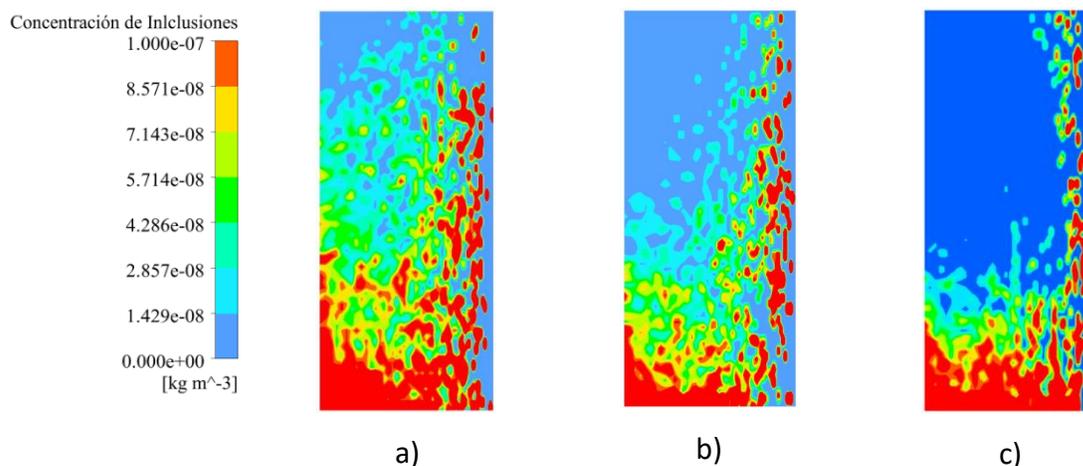


Figura 14 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 20 segundos de remoción  
 a) flujo bajo, b) flujo medio, c) flujo alto.

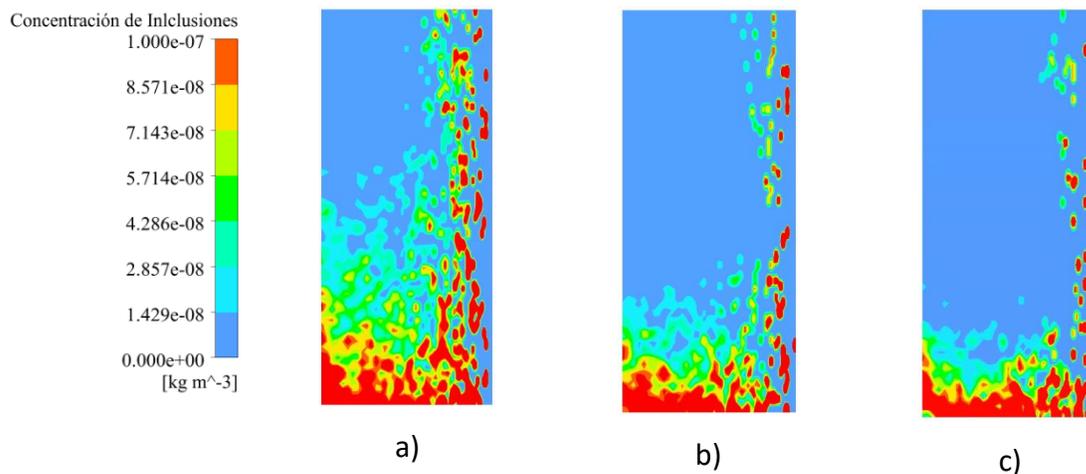
Se observa a los 20 segundos (**Figura 14**) una tendencia, donde la zona superior comienza a eliminar inclusiones, esto debido a los patrones de flujo que presenta el agua, arrastrando las inclusiones hacia la zona inferior del modelo, de la misma manera se logra ver el arrastre que sufren las inclusiones por el flujo de gas. Son estas inclusiones las que se eliminan del sistema por la condición de la frontera al entrar en contacto con el outlet. A los 20 segundos el flujo medio y alto alcanzan un porcentaje de remoción muy similar, de 52 y 53 por ciento respectivamente, mientras que el flujo bajo muestra un comportamiento más lento en esta tarea, con un 38 por ciento de inclusiones eliminadas.



*Figura 15 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 40 segundos de remoción a) flujo bajo, b) flujo medio, c) flujo alto.*

Los contornos tomados a 40 segundos (**Figura 15**) muestran una acumulación de las inclusiones en la zona inferior del sistema, siendo más específico en la esquina contraria a la inyección de aire, esto cobra sentido al observar los resultados de la **Figura 7** para el perfil de 4 cm, ya que a alturas bajas del modelo la velocidad radial decae rápidamente al alejarnos del eje de simetría, esto podría ser indicio de la existencia de una zona muerta (zona donde la velocidad del líquido es muy baja), esto siendo un indicador de que la inyección céntrica de gas en este tipo de hornos puede no ser lo mejor, sería interesante observar el efecto del

número de puntos de inyección y la distribución de estos en la olla para hacer más eficiente la homogénea remoción de inclusiones en el horno. Por otra parte los porcentajes de remoción de inclusiones para los flujos bajo, medio y alto respectivamente fueron de 61, 73 y 75 por ciento, disminuyendo la diferencia entre el flujo bajo y los 2 flujos restantes en casi un 10% en comparación a los resultados de 20 segundos, mientras que el flujo medio y alto se mantienen en porcentajes muy similares.



*Figura 16 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 60 segundos de remoción  
a) flujo bajo, b) flujo medio, c) flujo alto.*

A 60 segundo (**Figura 16**) y 80 segundos (**Figura 17**) solo la zona inferior presenta inclusiones aún no removidas en la zona muerta de la olla.

Todos los contornos concuerdan con los resultados presentados en el gráfico de remoción de inclusiones, donde a mayor flujo la remoción era más rápida (87 por ciento de remoción), ya que al comparar a todos los tiempos los contornos de los 3 flujos, encontramos una menor concentración de inclusiones en el sistema en el de mayor flujo, y esta tendencia se cumple también al comparar los contornos de flujo medio y bajo, ya que la inyección media de aire también elimina más inclusiones (el 85 por ciento) que con el menor flujo de inyección (75 por ciento).

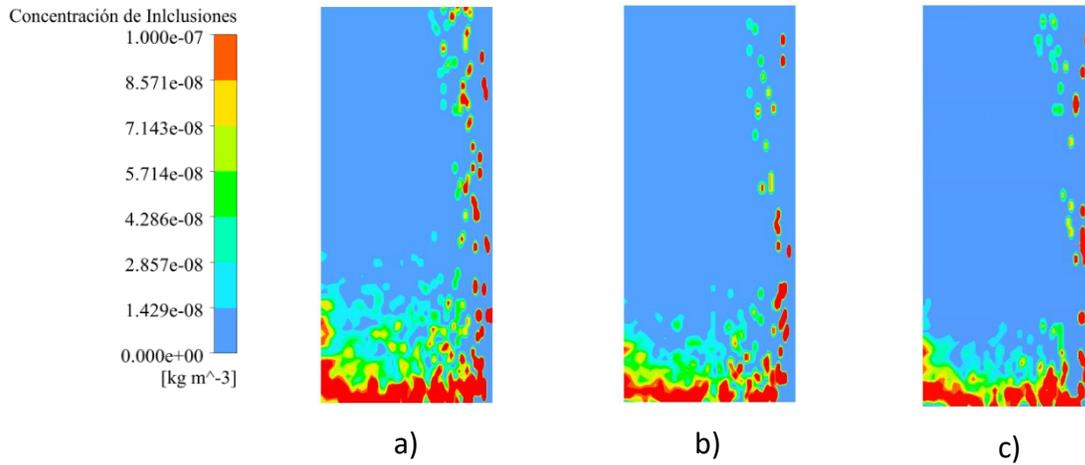


Figura 17 Contornos de concentración de Inclusiones para los 3 flujos a 80 segundos de remoción

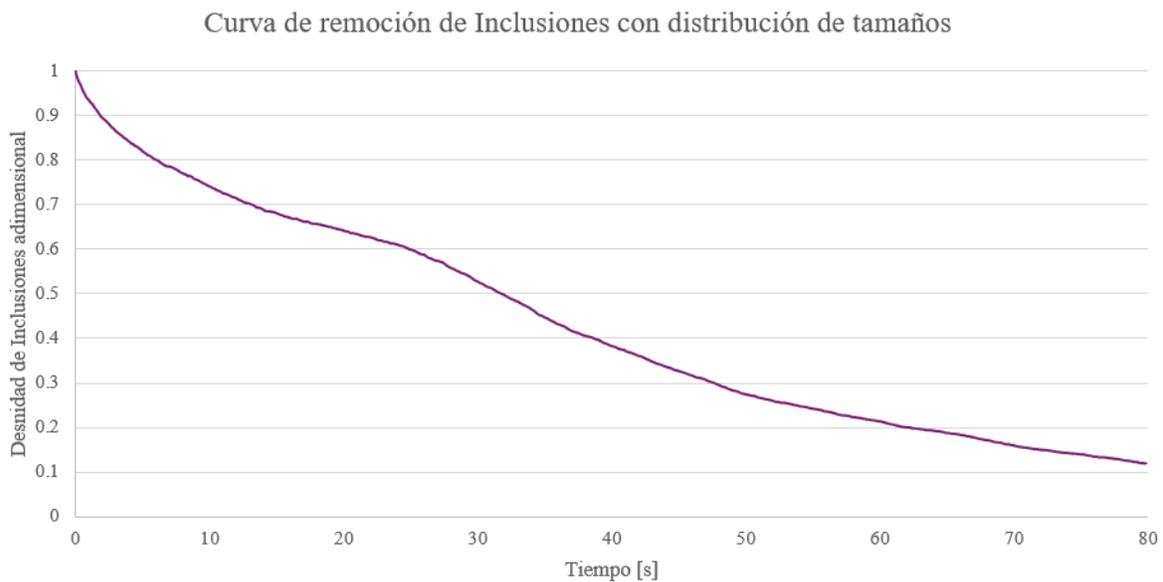
a) flujo bajo, b) flujo medio, c) flujo alto.

Aunque con las condiciones utilizadas en este trabajo la inyección de un flujo mayor tiene como resultado una mayor remoción de inclusiones, es importante recalcar que en la práctica puede no funcionar de esta manera, ya que existen fenómenos importantes como la coalescencia de inclusiones la cual propicia la formación de coágulos que flotan de una manera más rápida hacia la superficie, el uso de flujos extremadamente altos puede causar la ruptura de dichos coágulos teniendo efectos negativos en lugar de beneficiar a la eliminación de estas partículas. Además en un horno la densidad del acero en comparación a la densidad de las inclusiones es prácticamente del doble, mientras que las densidades del agua y las inclusiones utilizadas en este trabajo son muy similares.

### 3.3 Resultados de la remoción de inclusiones (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión).

Para este cálculo se utilizó el mismo flujo de aire inyectado que en la prueba a flujo bajo por lo que se comparan directamente ambos resultados. De forma inicial esperamos observar un cambio en la velocidad de remoción de las inclusiones, ya que inclusiones como un mayor tamaño deberían flotar con mayor facilidad hacia la superficie.

En este caso se desprecian los fenómenos de coalescencia y ruptura entre inclusiones, y es de interés observar si existe una diferencia en la distribución de las inclusiones dependiendo de su diámetro. En la Figura 18 Gráfica de remoción de inclusiones, densidad de inclusiones adimensional contra el tiempo de remoción (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión). **Figura 18** se muestra la curva de remoción de esta simulación.



*Figura 18 Gráfica de remoción de inclusiones, densidad de inclusiones adimensional contra el tiempo de remoción (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión).*

En la **Figura 19** se observa una representación de cómo se distribuyen las inclusiones en el sistema después del tiempo de mezclado y antes de activar la condición de escape, en esta podemos ver una distribución uniforme de dichas inclusiones. Los diámetros están representados mediante una escala relativa a los tamaños de inclusión.

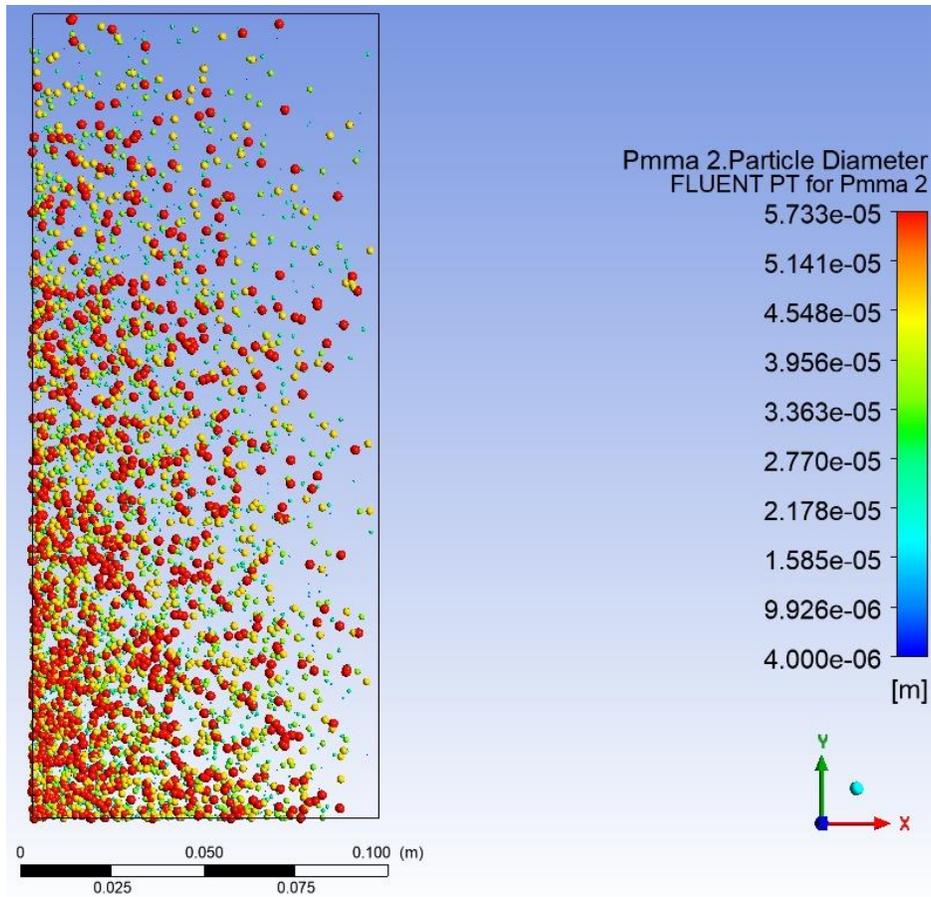


Figura 19 Representación de la distribución de inclusiones con diferentes diámetros.

De igual manera como se realizó para las curvas correspondientes a la **Figura 11**, en la **Tabla 8**, se muestran las ecuaciones correspondientes a las regresiones exponenciales para lograr realizar una comparación cuantitativa de los resultados.

Tabla 8 Ecuación de las curvas utilizando el flujo baño de inyección y diferente condición para los diámetros de inclusión.

	<i>Ecuación de la curva</i>	<i>Coefficiente de determinación (R2)</i>
<i>Flujo Bajo y diámetro de inclusión constante</i>	$y = 0.9745e^{-0.023x}$	$R^2 = 0.9726$
<i>Flujo Bajo y distribución de diámetros</i>	$y = 1.0412e^{-0.026x}$	$R^2 = 0.9793$

Con estas ecuaciones se obtuvieron los datos de inclusiones eliminadas del modelo, donde no se observa una diferencia significativa entre ambas pruebas, ya que aunque el cálculo con distribución de tamaños muestra una remoción más rápida, la diferencia con la prueba a diámetro constante de inclusión no es tan alta, un 2.6 % de diferencia existe en las inclusiones eliminadas entre ambos modelos.

*Tabla 9 Porcentaje de inclusiones eliminadas en el sistema a diferentes tiempos de remoción (Cálculo con distribución de tamaños de inclusión).*

<b>% Porcentaje de inclusiones eliminadas del sistema</b>								
<b>Tiempo</b>	10	20	30	40	50	60	70	80
<b>Cálculo con distribución de tamaños</b>	19.72	38.10	52.27	63.20	71.62	78.12	83.13	86.99
<b>Cálculo con diámetro constante</b>	22.53	38.45	51.1	61.14	69.13	75.47	80.51	84.52

En la **Figura 20** se muestra la comparación visual del porcentaje de inclusiones eliminado, donde observamos que a partir del segundo 20 parece existir la tendencia de una mayor remoción por parte de la simulación utilizando distintos tamaños de inclusión, sin embargo, esta diferencia al ser tan pequeña puede deberse a los errores asociados a las regresiones exponenciales para cada caso. Figura 20 Comparación en el porcentaje de inclusiones removidas (Cálculo con distribución de tamaño

### Comparación en la eliminación de inclusiones a flujo constante y diferente codición de tamaños de inclusión

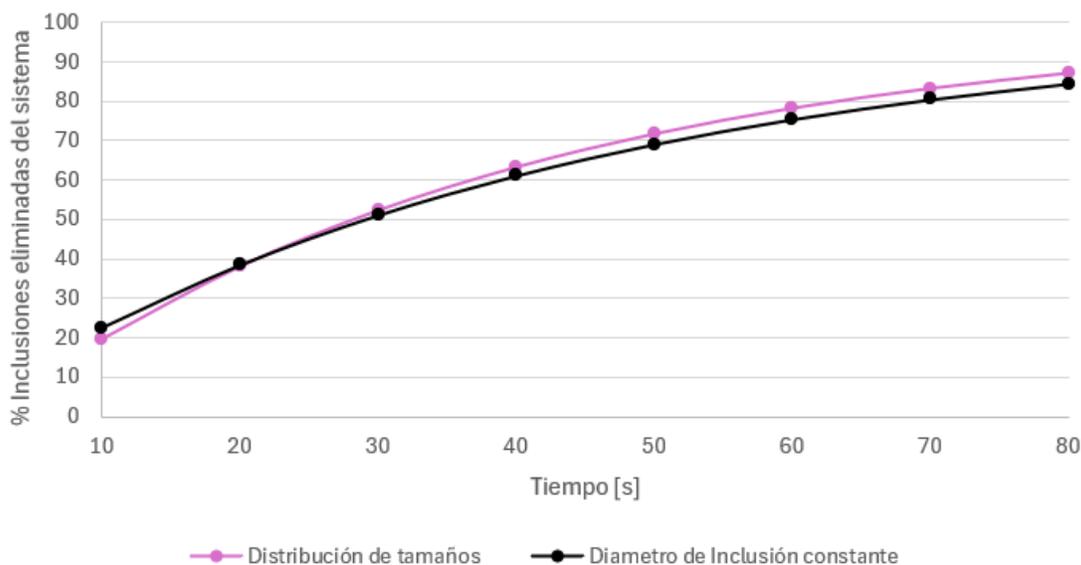


Figura 20 Comparación en el porcentaje de inclusiones removidas (Cálculo con distribución de tamaños)

Como se mencionó anteriormente este cálculo buscaba identificar el efecto del diámetro de la inclusión en su distribución en la olla y la eliminación de esta en el sistema, sin embargo, parece no existir una gran diferencia entre ambos casos. En este cálculo se consideró a la fuerza de arrastre que imprime el fluido sobre las partículas como la principal fuerza que actúa sobre las inclusiones, otra fuerza que se consideró fue la fuerza de gravedad, sin embargo y por los resultados observados dicha fuerza no tiene un gran efecto sobre las partículas. Las partículas seguídas en el sistema al tener una densidad cercana a la del agua parecen ignorar la fuerza boyante, ya que al tener inclusiones de un mayor tamaño, deberían removerse con mayor tasa que las inclusiones pequeñas, inclusive esto nos lo dice la práctica, la cual menciona que la formación de coágulos de inclusiones en el horno olla favorece su remoción por flotación hacia la escoria, cosa que no parece estar muy presente en este caso ya que la remoción de inclusiones de mayor tamaño (50 micras) es muy similar a la remoción de las inclusiones pequeñas (4 micras).

### 3.4 Posibles rutas a seguir en futuros trabajos de esta línea de investigación.

Este proceso como la mayoría de los procesos presentes en la metalurgia tiene un alto nivel de complejidad, al realizar distintas simplificaciones dentro del modelo es posible afectar de distintas maneras el comportamiento de las inclusiones dentro del sistema.

En futuros trabajos sería interesante trabajar con un modelo que permita simular la coalescencia de las inclusiones y con esto, la formación de clusters y la ruptura de los mismos, ya que al eliminar esta simplificación podemos sumar a los resultados de este presente trabajo el efecto del flujo inyectado sobre la ruptura y formación de coágulos, fenómeno fundamental en los hornos olla. Para esto sería necesario también implementar un modelo que implemente más fuerzas sobre las partículas, no solo la fuerza de arrastre y de gravedad utilizadas en este trabajo.

La escoria también juega un papel principal en la eliminación de inclusiones, al utilizar superficie libre plana como condición de frontera se supone que la escoria no sufre deformación debido al flujo de aire inyectado, de esta manera considerando a la superficie de interface como constante, sin embargo en la realidad se presenta la formación de un ojo de escoria en la superficie del baño, disminuyendo en gran parte el área interfacial entre el acero y la escoria, por lo cual la tasa de remoción de inclusiones disminuye. De esta manera el añadir una función definida por el usuario (UDF) permitiría añadir al sistema la fase escoria y la fase aire dentro de la olla. Esta UDF debe permitir el cambio en la condición de eliminación de las partículas discretas, ya que al existir ahora aceite y aire entre la fase agua y el outlet las inclusiones nunca estarán en contacto con dicha frontera, por lo que la encargada de realizar la remoción de las mismas debe ser la escoria, de esta manera la inclusión al estar en contacto con la escoria sufrirá una posible absorción por parte de la misma eliminándola del sistema por medio de la opción de remover partículas al estar en una zona donde la fracción volumen de la fase secundaria (aceite) sea mayor a 0.5. Otros posibles mecanismos de remoción que se pueden añadir a una hipotética UDF son el atrapamiento de la inclusión por parte de las paredes refractarias del horno y por el atrapamiento de las burbujas de aire inyectadas desde el inlet, sin embargo, estás

condiciones dificultan el problema ya que se tiene que contemplar también la probabilidad de que alguno de estos fenómenos ocurra, ya que en la realidad el cien por ciento de las inclusiones que chocan con las paredes del horno o que están en contacto con las burbujas de aire no son removidas o eliminadas por estos mecanismos.

## 4. Conclusiones

Utilizando un modelo Euleriano para la multifase, el modelo de fase discreta para las inclusiones y el modelo  $k-\epsilon$  realizable como modelo de turbulencia fue posible simular de manera satisfactoria la fluodinámica presente en el sistema validada con mediciones experimentales, además el fenómeno de remoción de inclusiones en una olla agitada con inyección céntrica de gas fue exitosamente simulado.

El flujo de aire inyectado en la olla tiene un efecto significativo en la remoción de inclusiones, ya que al aumentar el flujo inyectado la cinética de remoción aumenta, eliminando un mismo número de inclusiones en un tiempo menor. Sin embargo, esto se realizó sin considerar los efectos del flujo sobre la coalescencia y ruptura de cúmulos o coágulos de inclusiones.

El flujo de aire que muestra un mejor comportamiento es el flujo medio alcanzando en los 80 segundos de remoción el 91% de inclusiones eliminadas del sistema, esto toma cierta importancia, ya que en la práctica industrial del horno olla el gas que utilizado para la inyección es argón, de esta forma al no existir una diferencia tan clara en el porcentaje de inclusiones eliminadas entre el flujo alto (93 %) y el flujo medio (91%) , como si la existe entre el flujo medio (91 %) y el flujo bajo (84 %), este flujo intermedio se considera el ideal para la práctica en este sistema en específico.

Debido a las simplificaciones implicadas en este trabajo la distribución de tamaños de inclusión no se consideró una variable primordial en la velocidad de remoción de las inclusiones.

Los futuros trabajos en este tema podrían tomar diferentes caminos, entre los que están agregar un modelo que permita estudiar la coalescencia de inclusiones y ruptura de los cúmulos de estas, agregar la fase escoria al sistema e implementar con esto, un mayor número de mecanismos de remoción y por último estudiar el efecto del número de tapones porosos en la olla y la posición de estos sobre el fenómeno de remoción de inclusiones.

## Referencias

- [1] "CANACERO". CANACERO. Accedido el 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.canacero.org.mx/>
- [2] World Steel in Figures 2023. (s. f.). worldsteel.org. Recuperado 27 de febrero de 2024, de <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>
- [3] "Steel production: from iron ore to functional industrial products." Vepica. Accedido el 5 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.vepica.com/blog/steel-production-from-iron-ore-to-functional-industrial-products>
- [4] D. Mazumdar y J. W. Evans, «Modeling of Steelmaking Processes», CRC Press, ago. 2009. doi: 10.1201/b15828.
- [5] Ahindra Ghosh, Siderurgia Secundaria | Principios y Aplicaciones. (s. f.). Recuperado 13 de septiembre de 2023, de <https://www.taylorfrancis.com/pdfviewer/>
- [6] Gómez Rodríguez, A. L., Ramírez Argáez, M. A. UNAM. (2023). Comparación entre los modelos euleriano y VOF-DPM-(K-Épsilon) para la descripción numérica de la interacción agua-aceites en modelo físico de ollas agitadas con gas.
- [7] Dr. Dmitri Kopeliovich, Inclusiones no metálicas en el acero. Recuperado el 26 de noviembre del 2023.
- [8] Y. Liu, M. Ersson, H. Liu, P. G. Jonsson, and Y. Gan, "A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy," Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 50, pp. 555–577, Feb 2019
- [9] Kwon J., Zhang J., Lee H. (2008). "A CFD-based nucleation-growth-removal model for inclusion behavior in a gas-agitated ladle during molten steel deoxidation. (s. f.)". <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.891>
- [10] Felice V. D., Daoud I. L. A., Dussoubs B., Jardy, A., & Bellot, J.-P. (2012). "Numerical Modelling of Inclusion Behaviour in a Gas-stirred Ladle". ISIJ International, 52(7), 1273-1280. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1273>

- [11] Huang, A., Gu, H., Zhang, M., Wang, N., Wang, T., & Zou, Y. (2013). "Mathematical Modeling on Erosion Characteristics of Refining Ladle Lining with Application of Purging Plug". *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(3), 744-749. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9805-0>
- [12] Lou W., Zhu M. (2013). "Numerical Simulations of Inclusion Behavior in Gas-Stirred Ladles". *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(3), 762-782. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9802-3>
- [13] Xu Y., Ersson M., & Jönsson P. G. (2016). "A Numerical Study about the Influence of a Bubble Wake Flow on the Removal of Inclusions". *ISIJ International*, 56(11), 1982-1988. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-249>
- [14] Cao Q., & Nastac L. (2018). "CFD Modeling of Transport Phenomena and Inclusion Removal in a Gas-Stirred Ladle". En L. Nastac, K. Pericleous, A. S. Sabau, L. Zhang, & B. G. Thomas (Eds.), "CFD Modeling and Simulation in Materials Processing" 2018 (pp. 133-139). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72059-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72059-3_13)
- [15] Wang H., Wang N., Li X., Chen M. (2022). "Numerical Simulation of Inclusion Coagulation During Soft Blowing Process of Ladle Furnace". *Minerals, Metals and Materials Series*, pp. 563 - 573. DOI: 10.1007/978-3-030-92388-4\_51
- [16] Lou W., & Zhu M. (2014). "Numerical Simulations of Inclusion Behavior and Mixing Phenomena in Gas-stirred Ladles with Different Arrangement of Tuyeres". *ISIJ International*, 54(1), 9-18. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.9>
- [17] ANSYS Inc., ANSYS Fluent 19 Theory Guide.
- [18] J. López. (2016). "Modelado físico y matemático de intercambios metal/escoria en ollas de acero agitadas con gas," UNAM

## Anexos

### A. Tabla de símbolos

Tabla 10. Tabla de símbolos.

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
$q$	Fase (Pertenece a la fase continua)
$V_q$	Volumen de la fase $q$
$\alpha_q$	Fracción volumen de la fase $q$
$\rho_q$	Densidad de la fase $q$
$\vec{v}_q$	vector velocidad de la fase $q$
$\mu_{ef,q}$	Viscosidad efectiva para cada fase $q$
$\vec{g}$	Aceleración de la gravedad
$\mu_{l,l}$	Viscosidad molecular del líquido
$\mu_{t,l}$	Viscosidad turbulenta del líquido
$P$	Presión
$k$	Energía cinética turbulenta
$\mu_t$	Viscosidad turbulenta
$\sigma_k$ y $\sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl
$G_k$	Término de generación de $k$ por efecto del gradiente de la velocidad media de la fase continua
$\varepsilon$	Rapidez de dispersión de energía cinética turbulenta
$C_2$ y $C_{1\varepsilon}$	Constantes del modelo de turbulencia
$C_\mu$	Coefficiente del modelo de turbulencia
$A_0, A_S$ y $U^*$	Parámetros del Modelo de turbulencia
$S_{ij}$	Tensor de rapidez de deformación
$G_b$	Generación de energía cinética turbulenta como producto de la fuerza boyante
$Pr_t$	Número de Prandtl para energía
$g_i$	Componente de la aceleración gravitacional en la dirección
$\beta$	Coefficiente de expansión térmica
$\vec{U}_p$	Velocidad de la partícula
$T_D$	Término de arrastre de la partícula
$\vec{U}_{fP}$	Velocidad de la fase continua
$\rho_p$	Densidad de la inclusión
$\vec{F}_x$	Factor que considera fuerzas adicionales
$C_D$	Coefficiente de arrastre
$d_p$	Diámetro de la partícula
$Re$	Número de Reynolds
$a_1, a_2$ y $a_3$	Constantes empíricas del modelo de arrastre

## Anexo B. Resolución en ANSYS FLUENT

### B.1 General

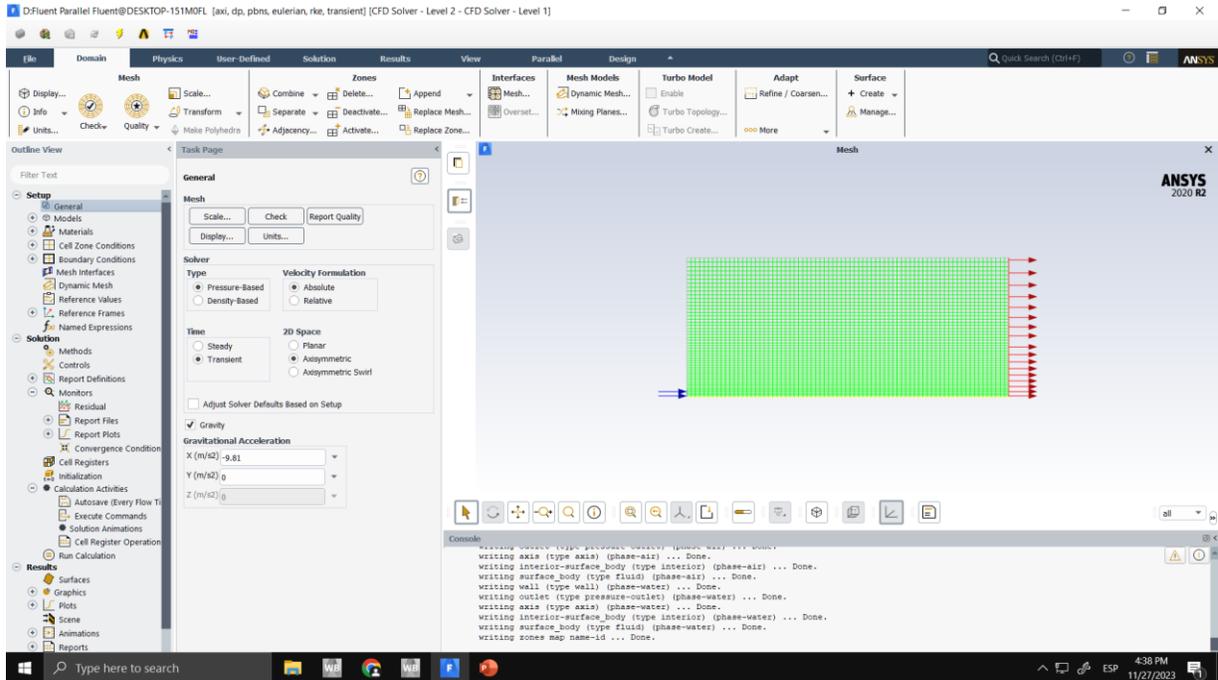


Figura 21 Pestaña general de ANSYS FLUENT

El estudio de la cinética de remoción de inclusiones conlleva a que nuestra simulación se resuelva en estado transitorio, se debe colocar también la condición de eje axisimétrico y colocar el valor de la gravedad en la componente “x” (ver **Figura 21**).

## B.2 Modelos

Se utiliza el modelo Euleriano para la fase continua y el modelo DPM para la fase discreta, además de agregar un modelo de turbulencia k- $\epsilon$  realizable, se muestran las pestañas utilizadas en dichos modelos:

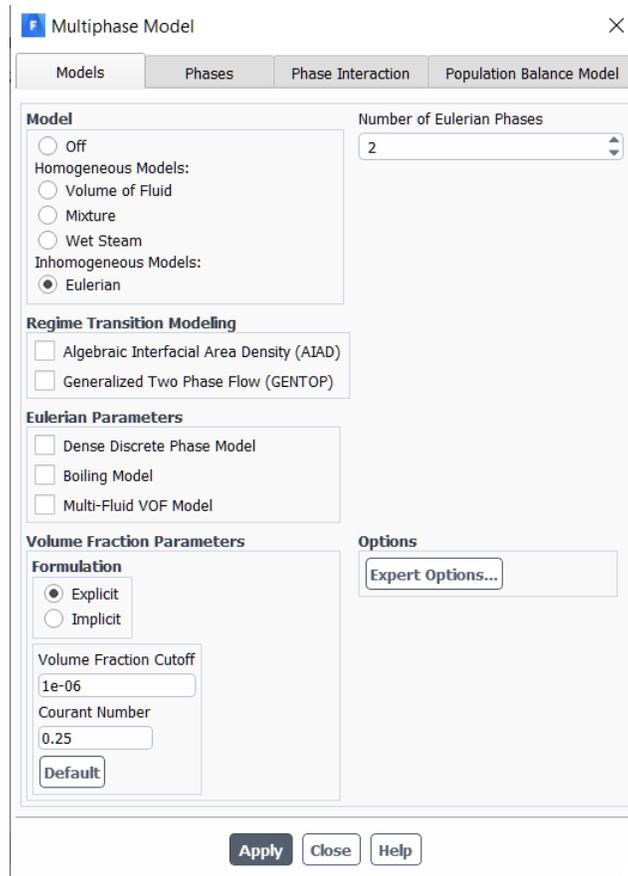


Figura 22 Pestaña del modelo multifásico.

Se activan 2 fases eulerianas (Agua y aire), el resto de las variables se mantiene tal cual las coloca el software, se utiliza una formulación explícita (ver **Figura 22**).

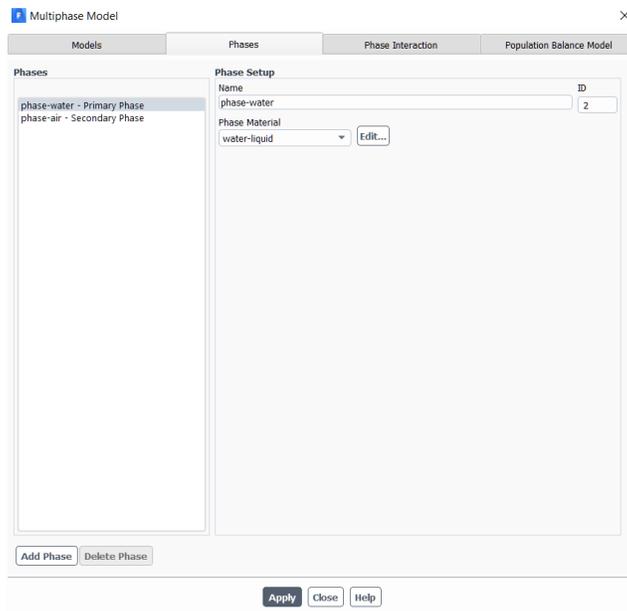


Figura 23 Pestaña del modelo multifásico (Fases).

Se coloca el agua como la fase principal y al aire como la fase secundaria, esto permitirá no realizar un patch de fases, simplemente el agua al ser la fase primaria estará presente en todo el sistema a la hora de inicializar el problema (ver **Figura 23**).

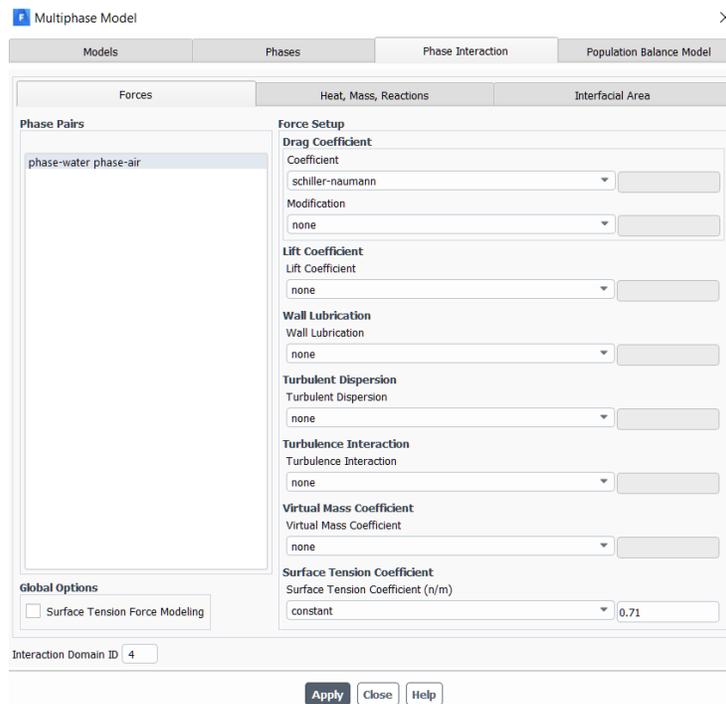
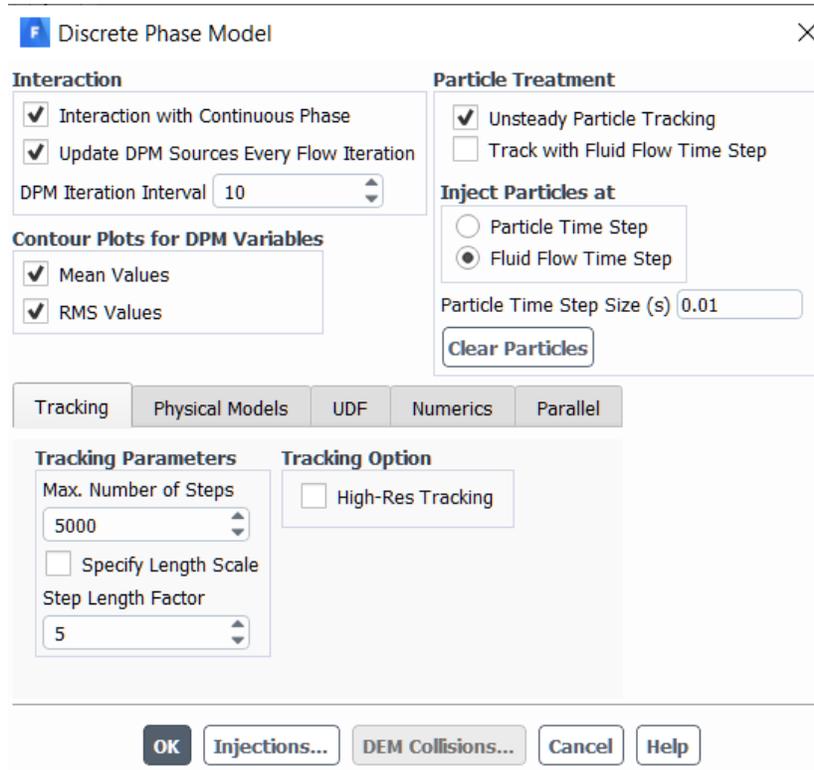


Figura 24 Pestaña del modelo multifásico (Interacción entre fases).

En esta parte se activa el coeficiente de tensión superficial entre el agua y el aire, esto como valor constante, además el coeficiente de arrastre se considera con la opción “Schiller-Naumann” (ver **Figura 24**).



*Figura 25 Pestaña del modelo de fase discreta.*

Se activa la opción de interacción con fase discreta, lo cual permitirá que las inclusiones se vean afectadas por el flujo de fluidos de la fase continua, se selecciona también un intervalo de interacción de DPM igual a 10, esto debido a que cada 10 iteraciones de la fase continua se realiza una iteración para la fase discreta, por lo que el tiempo de partícula debe ser 10 veces mayor, en este caso al trabajar con un salto de tiempo de 0.001 segundos el paso de tiempo de partícula será de 0.01 segundos (ver **Figura 25**).

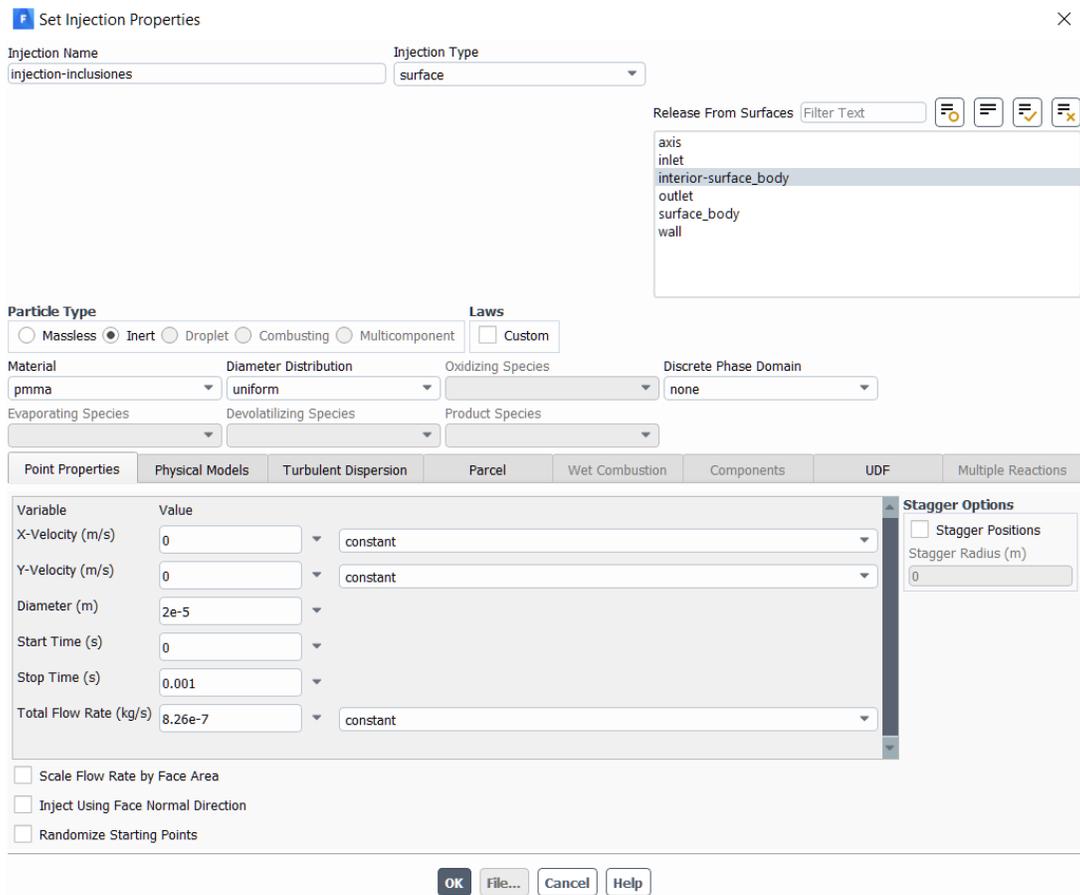


Figura 26 Pestaña del modelo de fase discreta (creación de la inyección).

La inyección se considera de tipo “superficie” y como plano de inyección se toma el “interior Surface body”, sin embargo, al momento de visualizar la distribución de las inclusiones después de la inyección se observa que solo se encuentran en el eje de simetría, por esta razón se da el tiempo de mezclado en la etapa de cálculo.

El diámetro de las inclusiones se considera como constante, se elige un tamaño de 20 micras debido a que es un valor intermedio dentro de un intervalo de tamaños presentes en el acero líquido.

Esta inyección se realiza en un solo paso de tiempo, por lo que tiempo de esta es de solo 0.001 segundos. El flujo utilizado de inyección fue colocado con el fin de obtener 7500 inclusiones totales en el sistema (ver **Figura 26**).

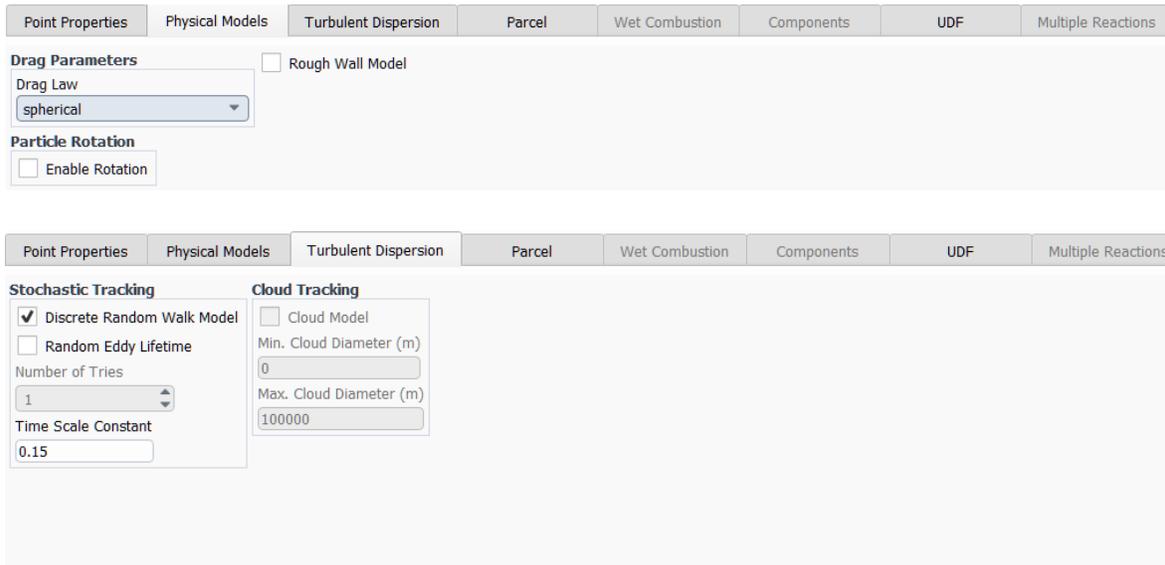


Figura 27 Pestaña del modelo de fase discreta (Modelos físicos de las partículas 1).

Se coloca la condición de arrastre de tipo esférico, además de activar la opción de Discrete Random Walk Model el cual supone que la partícula interactúa con el remolino de la fase fluida (ver **Figura 27**).

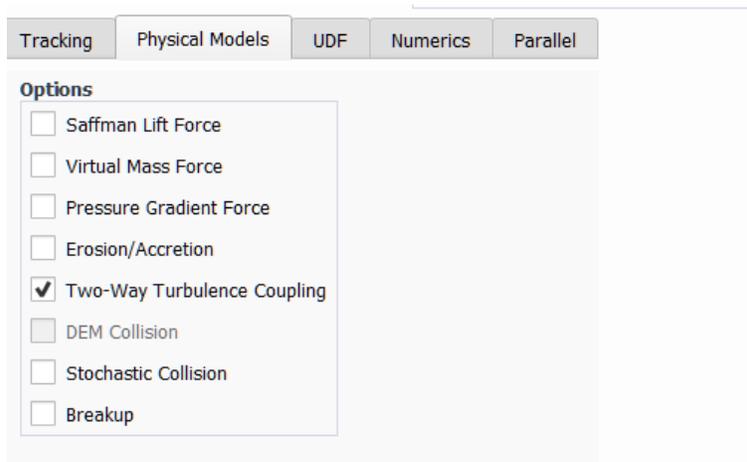


Figura 28 Pestaña del modelo de fase discreta (Modelos físicos de las partículas 2).

La opción Two-Way Turbulence Coupling se activa, esta nos permite considerar que algunos remolinos causados por la turbulencia se forman por las partículas discretas y no solo por el movimiento de la fase continua (ver **Figura 28**).

Para el caso en el que se requiera implementar la inyección de distintos tamaños de inyección se utiliza la opción de distribución de Rosin-Rammler (ver **Figura 29**).

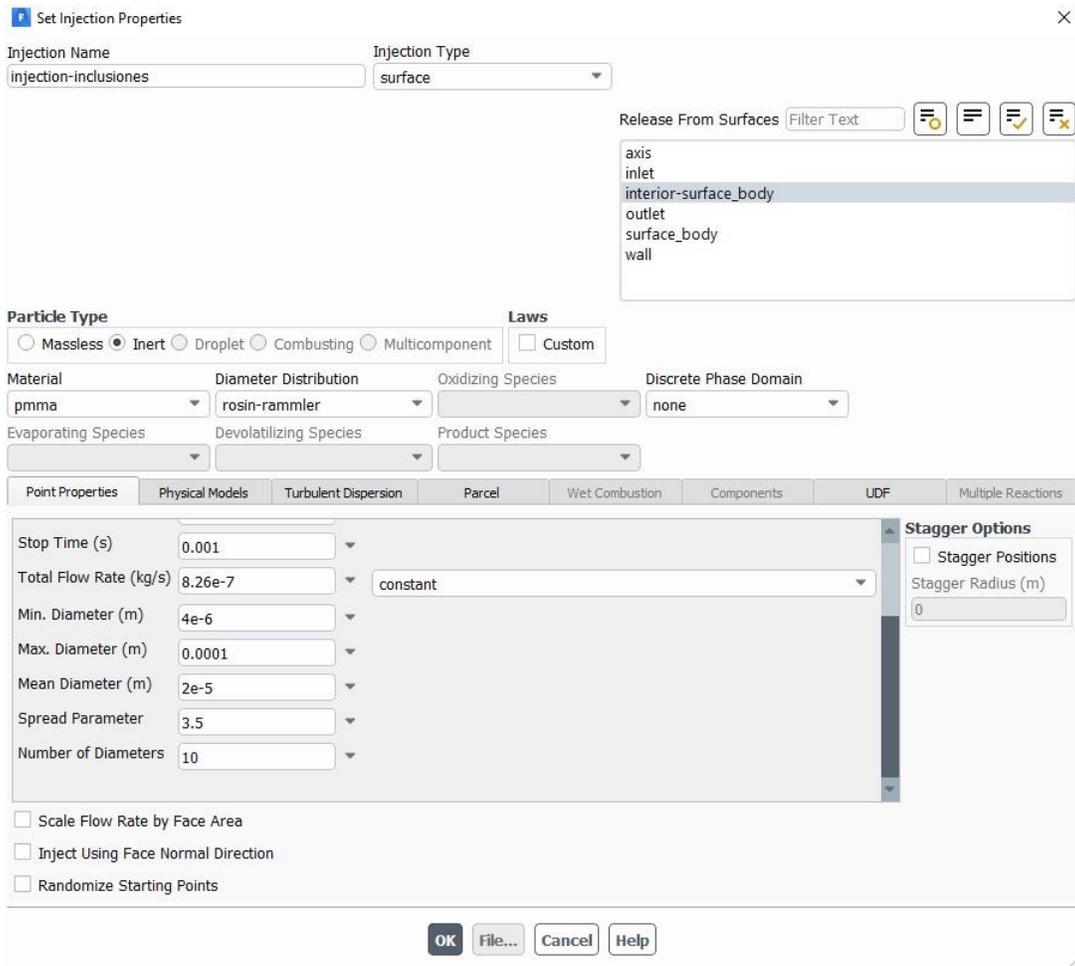


Figura 29 Pestaña de inyección para la distribución de tamaños de inclusión.

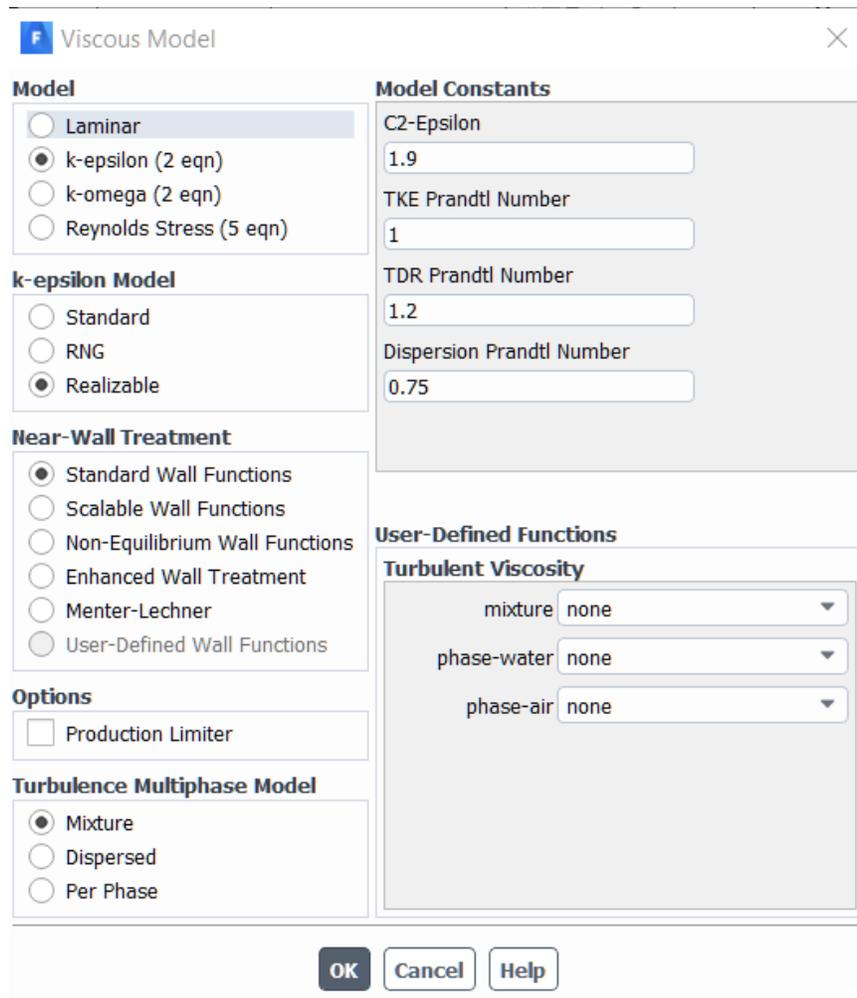


Figura 30 Pestaña del modelo de turbulencia.

Se activa la opción de modelo de turbulencia, seleccionando el modelo k- $\epsilon$ , posteriormente activar la opción “realizable”, el resto de las opciones se toman con los valores dados por el software (ver **Figura 30**).

## B.3 Materiales

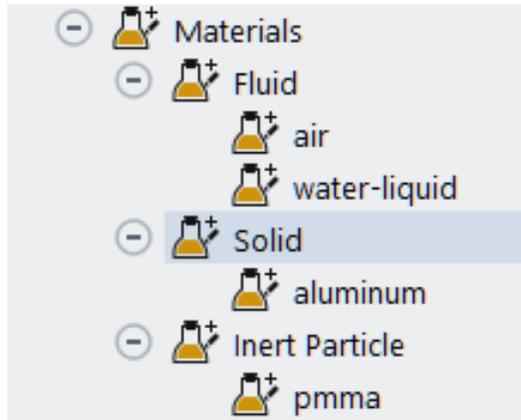


Figura 31 Vista general del apartado de materiales.

Create/Edit Materials

Name: pmma

Material Type: inert-particle

Order Materials by:  Name  Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Inert Particle Materials: pmma

Mixture: none

Fluent Database...  
GRANTA MDS Database...  
User-Defined Database...

**Properties**

Density (kg/m3): constant Edit...  
1200

Change/Create Delete Close Help

Create/Edit Materials

Name: water-liquid

Material Type: fluid

Chemical Formula: h2o<l>

Fluent Fluid Materials: water-liquid (h2o<l>)

Mixture: none

Order Materials by:  Name,  Chemical Formula

Fluent Database...  
GRANTA MDS Database...  
User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m3): constant, Edit..., 998.2

Viscosity (kg/m-s): constant, Edit..., 0.001003

Change/Create, Delete, Close, Help

Figura 32 Materiales agregados a la simulación.

Se agrega un material en la sección de fluido, este material es el agua líquida (ver **Figura 31**), el cual se encuentra en la base de datos de ANSYS FLUENT, también al activar el modelo DPM se añadirá una nueva sección de partícula inerte, en esta opción solo modificaremos el nombre y las propiedades del material base, ya que el polimetilmetacrilato no se encuentra en la base de datos, pero solo necesitamos su densidad (ver **Figura 32**).

## B.4 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera son una parte crucial de la resolución, se tienen tres distintas condiciones, el inlet, outlet y las paredes.

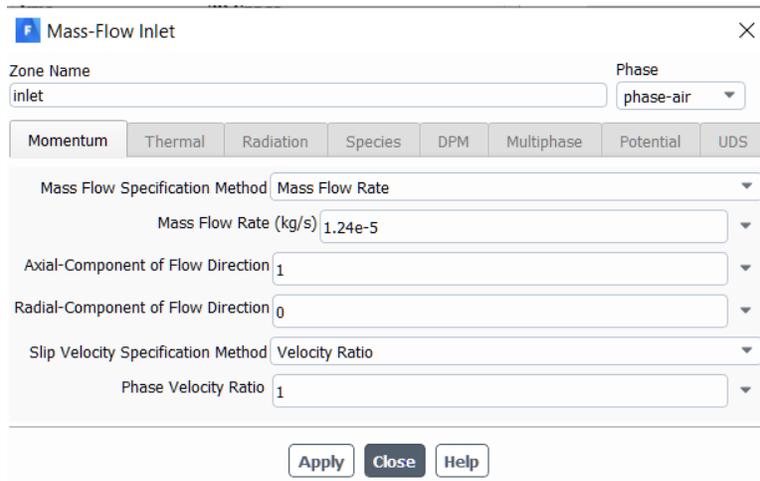


Figura 33 Condición de Inlet.

Esta condición nos permite colocar los valores necesarios para la inyección de aire, colocando el inlet de tipo “mass flow inlet” el cual nos permite colocar un valor de flujo inyectado de aire (ver **Figura 33**).

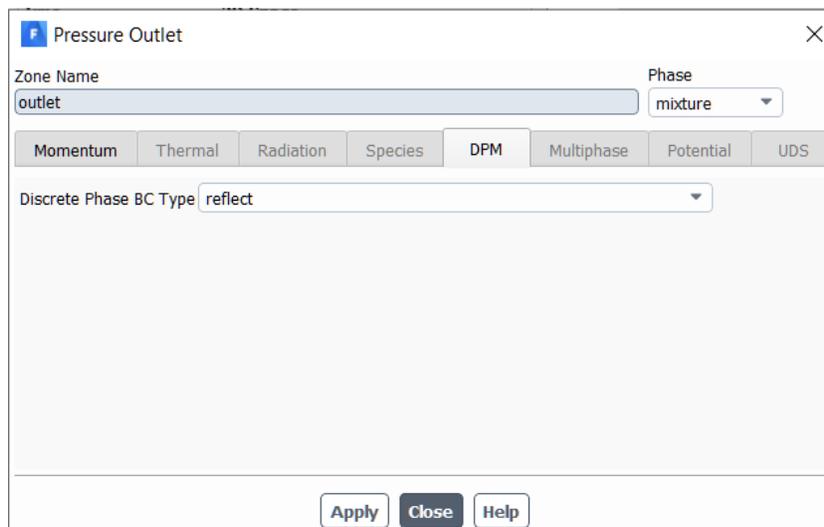
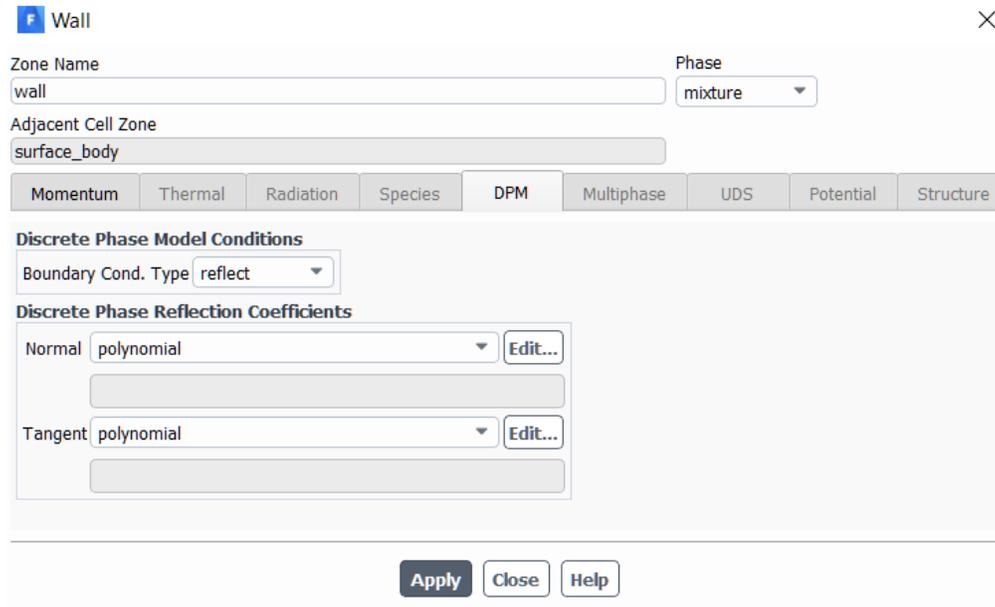


Figura 34 Condición de outlet.

Para el outlet se modifica la ventana de DPM, ya que esta frontera será la que nos permita realizar la remoción de las inclusiones, durante la fase de mezclado esta condición debe de estar colocada en “reflect”, una vez se quiere empezar la remoción se cambia la condición a “escape” (ver **Figura 34**).



*Figura 35 Condición en las paredes.*

Las paredes se consideran como paredes impermeables y fijas, para posteriormente colocar la condición de “reflect” en la pestaña DPM (ver **Figura 35**).

## B.5 Controles y cálculo

Los controles permiten colocar un factor de relajación en el cálculo de las ecuaciones utilizadas, este valor fue colocado en 0.08 para todas las opciones, esto permitió una correcta convergencia del problema (ver **Figura 36**).

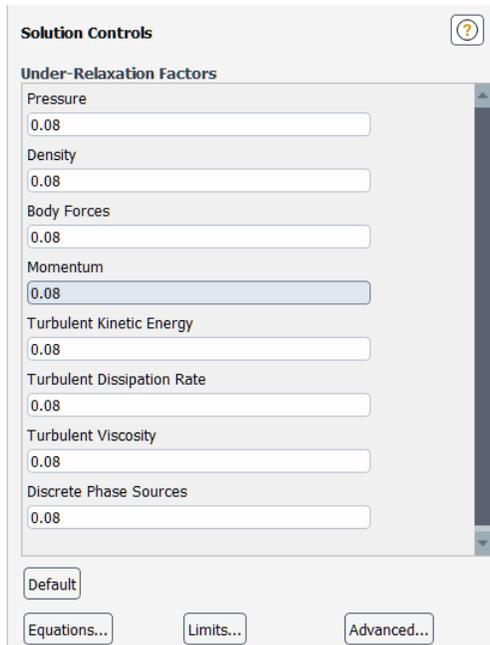


Figura 36 Valor de los controles.

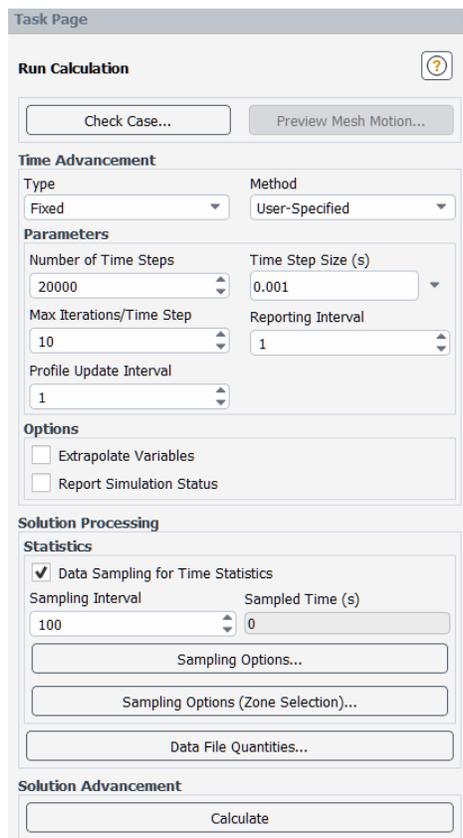
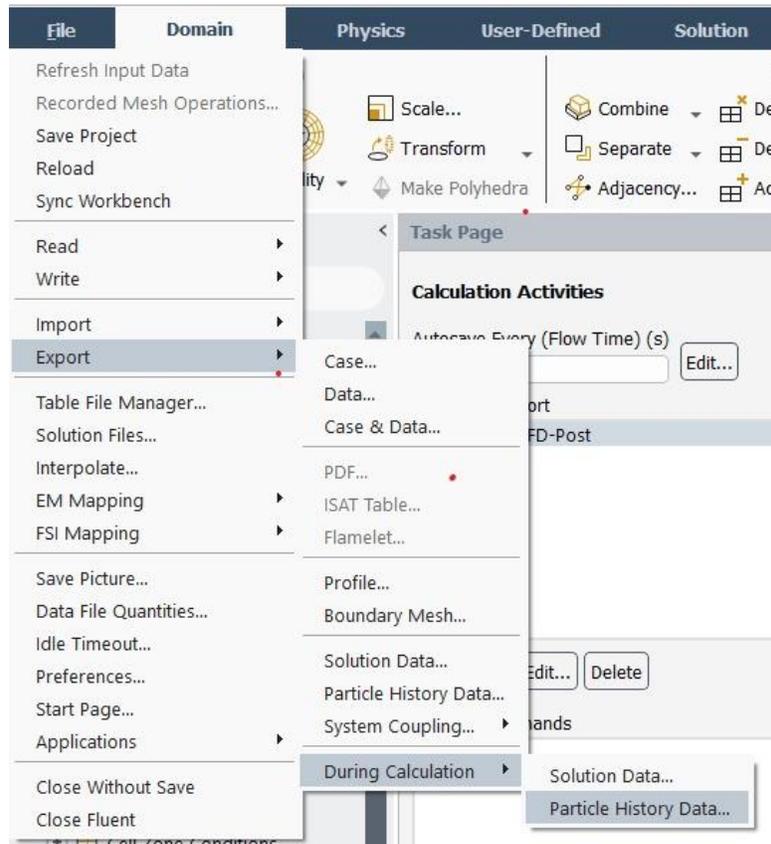


Figura 37 Valores para correr la simulación.

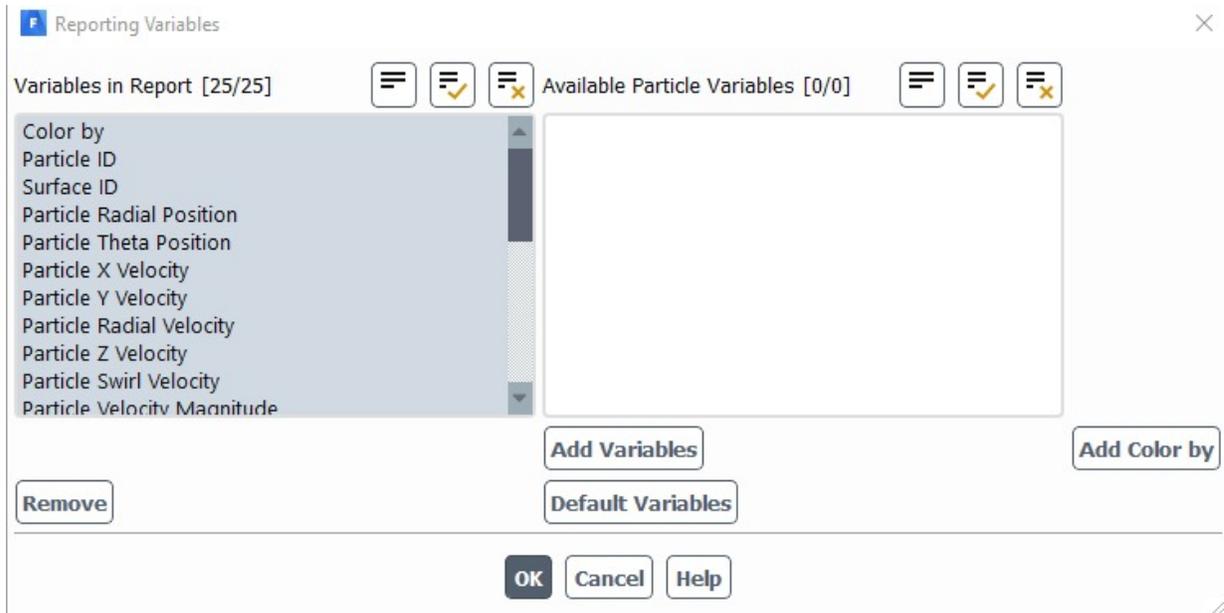
Se utiliza 2 veces distintas esta pestaña durante la simulación, en ambas el paso de tiempo es de 0.001 segundos, con 10 iteraciones por paso de tiempo, lo que cambia entre ambas es el número de pasos de tiempo por calculo, siendo para la primera etapa necesario correr 60 segundos para la homogeneidad del baño con respecto a las inclusiones y 80 segundos para la remoción (ver **Figura 37**).

### B.6 Seguimiento de las partículas discretas.



*Figura 38 Seguimiento de partículas*

Para realizar el seguimiento de las trayectorias de las partículas es necesario exportar un archivo durante el tiempo de cálculo, para esto seguimos la ruta marcada en la **Figura 388**.



*Figura 39 Propiedades disponibles en el seguimiento de partículas*

Se eligen y agregan las propiedades a las que se les requiere dar un seguimiento durante el cálculo. Posteriormente seleccionamos la carpeta de destino de dicha data y para observarlos en la herramienta de post-procesamiento será necesario importar dicho documento (ver **Figura 39**).