



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**MODELADO MATEMÁTICO DE LA
INCIDENCIA DE UN JET GASEOSO EN UN
BAÑO BIFÁSICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

JOSÉ ALFREDO DELGADO ÁLVAREZ



MÉXICO, D.F.

2012



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. Eusebio cándido Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Prof. Carlos González Rivera

SECRETARIO: Prof. Marco Aurelio Ramírez Argáez

1er. SUPLENTE: Prof. Juan Solórzano López

2° SUPLENTE: Prof. Héctor Cruz Mejía

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica
Laboratorio de Solidificación y Simulación Matemática
Edificio D, Facultad de Química, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. Juan Solórzano López

SUSTENTANTE (S):

José Alfredo Delgado Álvarez

La vida es hermosa, vivirla no es una casualidad.

A DIOS, por darme la bendición de tener una familia hermosa, unos amigos maravillosos, unos maestros excelentes y una vida plena.

A mis padres Iselda y Alfredo, a los cuales les debo la vida y son mi motivación y apoyo para seguir adelante, y las personas más importantes en mi vida.

A mis hermanos Francisco y Verónica, con los que he compartido toda una vida y no me queda más que darles las gracias por aguantarme todos estos años.

A mis amigos: Miriam, Daniel, David, Humberto, Erika, Cynthia, Israel y a todos aquellos con los que haya compartido una sonrisa, una alegría, una tristeza un fracaso. Muchas gracias por dejarme formar parte de sus vidas y hacer que esta vida sea mucho más feliz con personas como ustedes.

A mis profesores, los cuales han marcado y forjado mi camino con sus conocimientos, su apoyo y porque no, sus regaños, gracias.

Agradecimientos

- A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez, por el apoyo y confianza brindada en la elaboración de esta tesis.
- Al Dr. Juan Solórzano López, por el apoyo y amistad brindada en el desarrollo de la tesis.
- Al programa PAPIT IN 109310, por el apoyo para la realización de este trabajo.
- Al programa Roberto Rocca, por la beca otorgada y el impulso brindado para la culminación de mis estudios.

ÍNDICE

RESUMEN	2
CAPÍTULO 1, INTRODUCCIÓN	3
1.1 HIPÓTESIS	10
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
CAPÍTULO 2, METODOLOGÍA DE TRABAJO	18
2.1 MODELO MATEMÁTICO	18
2.2 ECUACIONES GOBERNANTES	18
2.2.1 Conservación de masa del marcador	19
2.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento del fluido	20
2.2.3 Modelo k- ϵ de turbulencia	20
2.2.4 Ecuación general de conservación	21
2.2.5 Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento	21
2.2.6 Fuerzas involucradas en la formación de la depresión	22
2.3 CONDICIONES DE FRONTERA	24
2.3.1 Paredes	24
2.3.2 Simetría	25
2.3.3 Fronteras abiertas	25
2.3.4 Chorro de gas de entrada	25
2.3.4.1 Energía cinética turbulenta	25
2.3.4.2 Rapidez de disipación de la energía cinética turbulenta	26
2.4 CONDICIONES INICIALES	26
2.5 PROPIEDADES FÍSICAS	27
2.6 METODOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	27
2.7 VARIABLES Y NÚMERO DE CÁLCULOS	32
2.8 SOLUCIÓN NUMÉRICA	32
CAPÍTULO 3, RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
3.1 MODELO MATEMÁTICO	35
3.1.1 Correlación empírica de Wakelin	35
3.1.2 Fases presentes y ubicación dentro del sistema	36
3.1.3 Geometría de la cavidad	40
3.1.4 Perfiles de velocidad	54
3.1.5 Patrones de recirculación	58
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	66
LISTA DE FIGURAS	67
LISTA DE SIMBOLOS	71
LISTA DE TABLAS	72
ANEXO 1	73

RESUMEN

En este trabajo se estudió la deformación de la superficie libre y los patrones de flujo desarrollados por la incidencia de un jet gaseoso en un baño bifásico a través de un modelo matemático, que sirve como herramienta para comprender, analizar y optimizar sistemas que presenten esta interacción entre un jet gaseoso y baños líquidos. En el caso de la industria metalúrgica, estos fenómenos los podemos encontrar en la producción de acero en el horno básico de oxígeno (BOF) donde la incidencia de un jet supersónico de oxígeno decarbura al arrabio, o en el horno de arco eléctrico, en donde un jet de oxígeno incide sobre el baño metálico y aporta energía alterna a la eléctrica. Los jets en este reactor motivan la realización de este proyecto. Debido a las agresivas condiciones de operación en este tipo de hornos, resulta prácticamente imposible realizar mediciones experimentales, por lo que los modelos matemáticos y modelos físicos son herramientas muy útiles para entender estos fenómenos. En este trabajo se desarrolló un modelo matemático en 3D para estudiar el intercambio de momentum entre el jet y un baño bifásico de dos líquidos inmiscibles (como el acero y la escoria). El modelo se resolvió numéricamente con la ayuda de un software computacional CFD (Computational fluid dynamics), FLUENT. Este modelo se validó a través de una correlación empírica que describe la profundidad adimensional de las cavidades resultantes en dicho fenómeno y se puede afirmar que el modelo podría ser utilizado en el futuro inmediato para simular operaciones metalúrgicas en aceración siempre que se acoplen los intercambios de masa y energía.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El acero es una aleación compuesta básicamente de hierro-carbono, donde el carbón no supera el 2% en peso, aunque otros elementos pueden estar presentes formando aleaciones multicomponentes comerciales con propiedades muy diversas y aplicaciones diferentes. El acero es la aleación más popular gracias a sus elevadas propiedades mecánicas y a la gran abundancia de hierro en el planeta, lo que lo convierte en una aleación con una gran utilidad, y a un precio relativamente bajo.

En la producción de acero existen dos rutas (ver **Figura 1**) [1]:

- 1) Ruta integrada; esta ruta inicia desde la extracción del mineral de hierro, el cual una vez concentrado y pelletizado puede pasar ya sea a un alto horno o un horno de reducción directa para reducir el mineral a hierro metálico. En el caso del alto horno se obtiene arrabio (aleación líquida de Fe saturada con carbono), el cual se convierte a acero en un horno BOF, donde se elimina el exceso de carbono por oxidación con oxígeno inyectado con una lanza. Posteriormente, el acero producido pasa a un proceso de refinación en el horno olla donde se eliminan las impurezas como inclusiones y elementos residuales no deseados, agitando el baño con gas argón o electromagnetismo para acelerar las cinéticas de las reacciones de refinación. Finalmente, el acero líquido refinado pasa al proceso de colada continua donde solidifica en formas diversas como planchones, tochos, etc. Alternativamente, el mineral de hierro puede reducirse en un reactor de reducción directa, donde se obtiene lo que se conoce como hierro esponja, el cual pasa a un horno eléctrico de arco donde se funde y se elimina el exceso de carbono y posteriormente, al igual que en la ruta integrada del alto horno, pasa al horno de olla para refinación secundaria y a la colada continua para su solidificación.
- 2) Ruta directa o no integrada; en esta ruta la materia prima es la chatarra, la cual es producto del reciclado de hierro y acero. Esta chatarra va directamente al horno de arco eléctrico, donde se elimina el exceso de carbono (refinación

primaria), y posteriormente como en la ruta integrada, pasa al horno olla para su refinación secundaria, y finalmente a la colada continua para su solidificación.

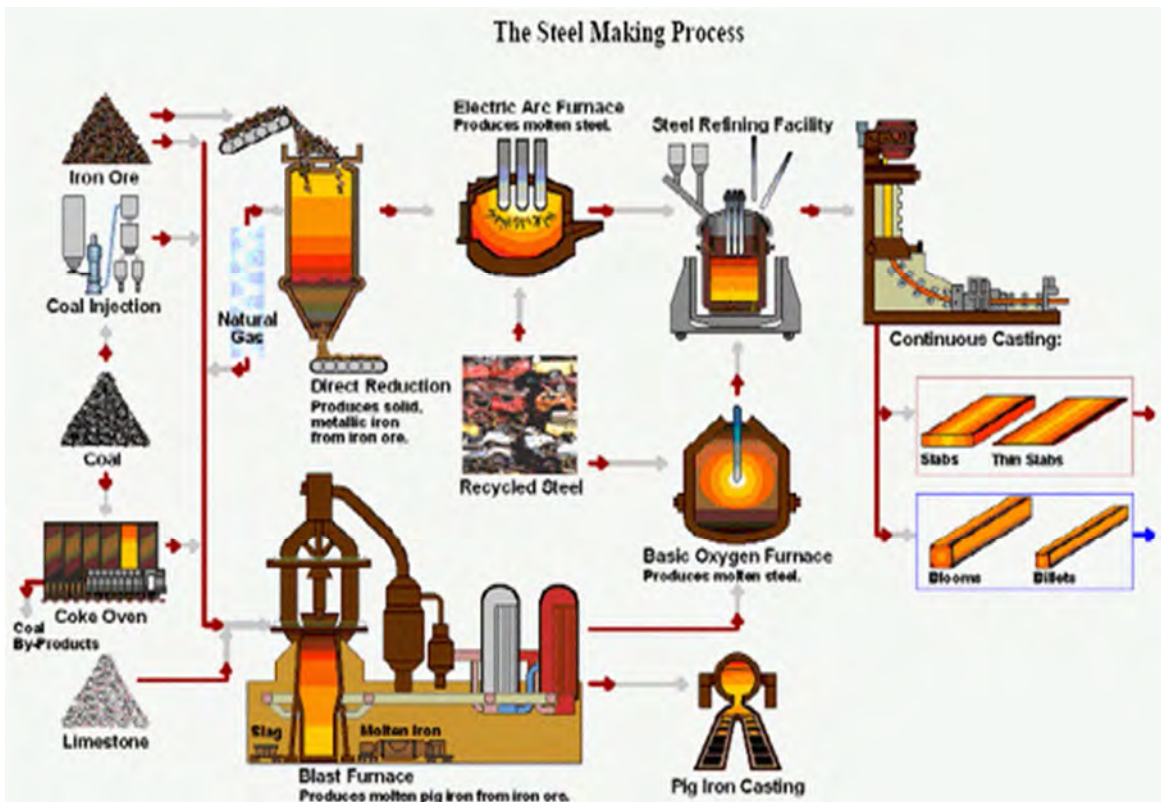


Figura 1. Esquema de las rutas de producción del acero [1].

El horno de arco eléctrico (EAF por sus siglas en inglés) que se muestra en la **Figura 2** [3], es un horno muy versátil: no solamente pueden alcanzarse altas temperaturas de hasta 1900°C, sino que también puede controlarse el aporte de energía eléctrica con una alta precisión, y como no emplea combustible alguno, se obtiene un producto con mayor pureza. Consecuentemente, puede producirse todo tipo de grados de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidables, etc.

Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco eléctrico entre los electrodos gigantes de grafito y la carga metálica produce un calor intenso. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno

cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos. La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente. El metal líquido solo queda contenido en la parte inferior del horno o crisol, mientras que el resto del horno está compuesto de paredes que son paneles de acero enfriados con agua.

Para acelerar la remoción del carbono, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de un tubo o lanza a través de jets. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes. Otra práctica común es inyectar oxígeno con finos de carbono para aportar energía por la reacción exotérmica de la oxidación de carbono a CO gaseoso para ahorrar energía eléctrica cara. Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada [2].

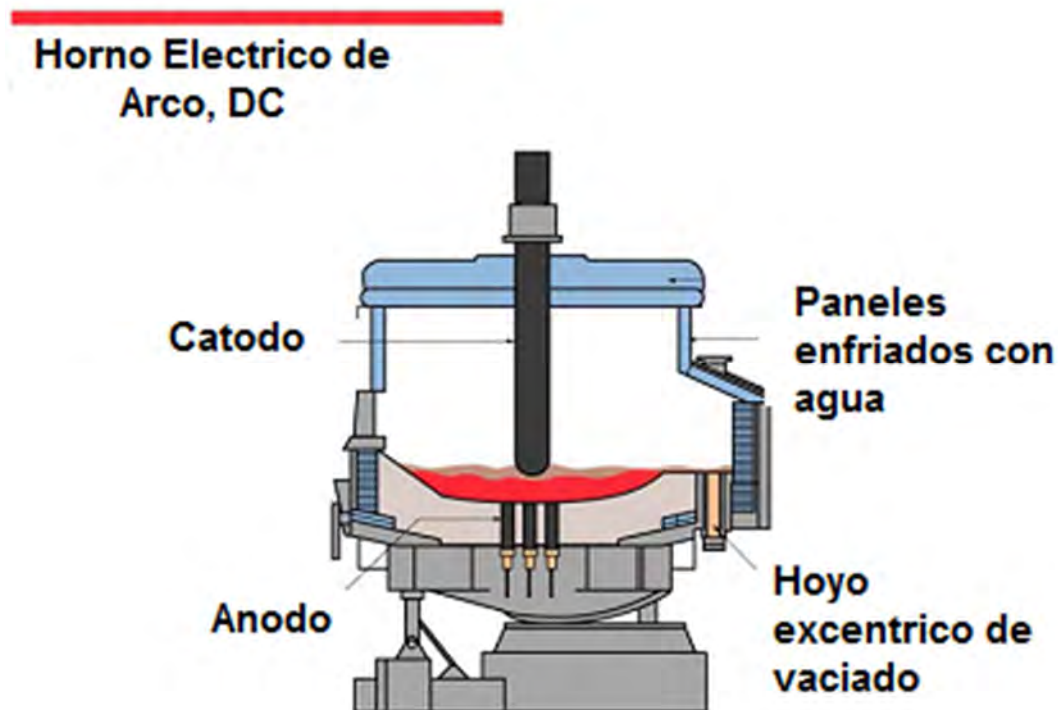


Figura 2. Esquema de horno eléctrico de arco de corriente directa [3].

En el caso del horno de arco eléctrico se cuenta con la presencia de jets de oxígeno incidiendo sobre el baño metálico, su posición en el horno se puede observar en una configuración típica como la mostrada en la **Figura 3** [4]. Los jets se activan con el fin de eliminar el exceso de carbono contenido en el baño y aportar energía química ahorrando energía eléctrica cara [4]. Optimizar el uso de los jets implica reducir los tiempos del proceso, lo cual significa reducir el consumo de energía eléctrica, elevar la producción, que a su vez implica la reducción de costos (ver **Figura 4**) [5], ya que en un país como México en donde la energía eléctrica es de las más caras del mundo, optimizar este proceso es importante.

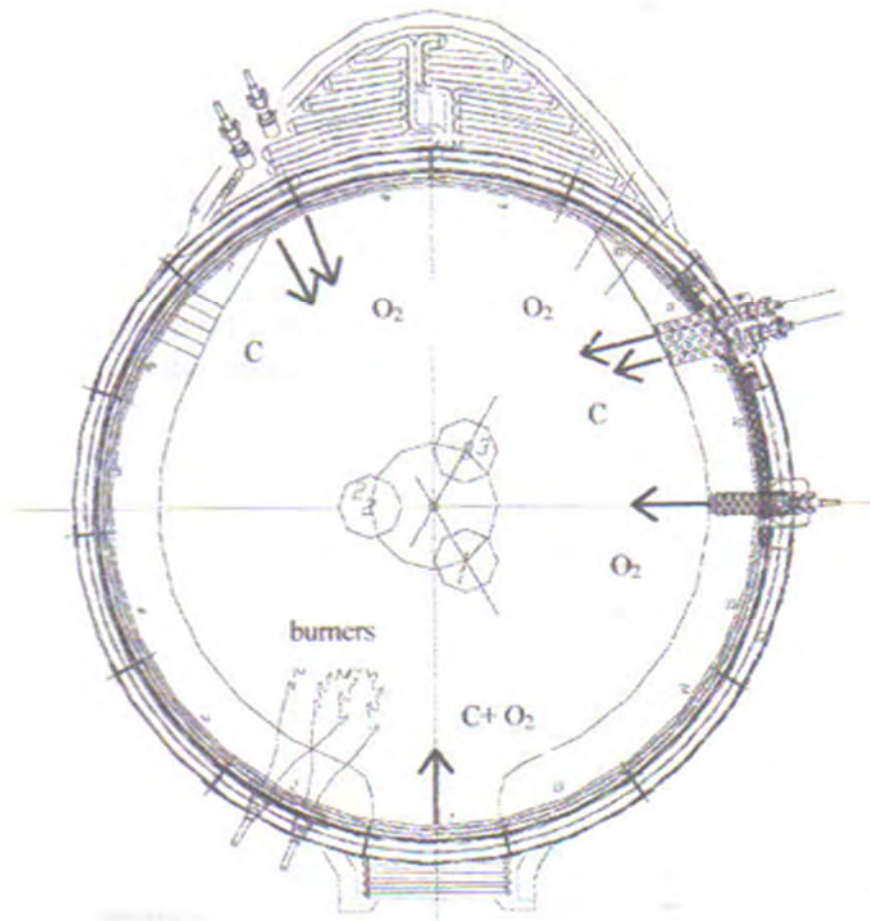


Figura 3. Posición de los jets de oxígeno dentro del horno eléctrico de arco [4].

EVOLUCION DEL HORNO ELECTRICO DE ARCO

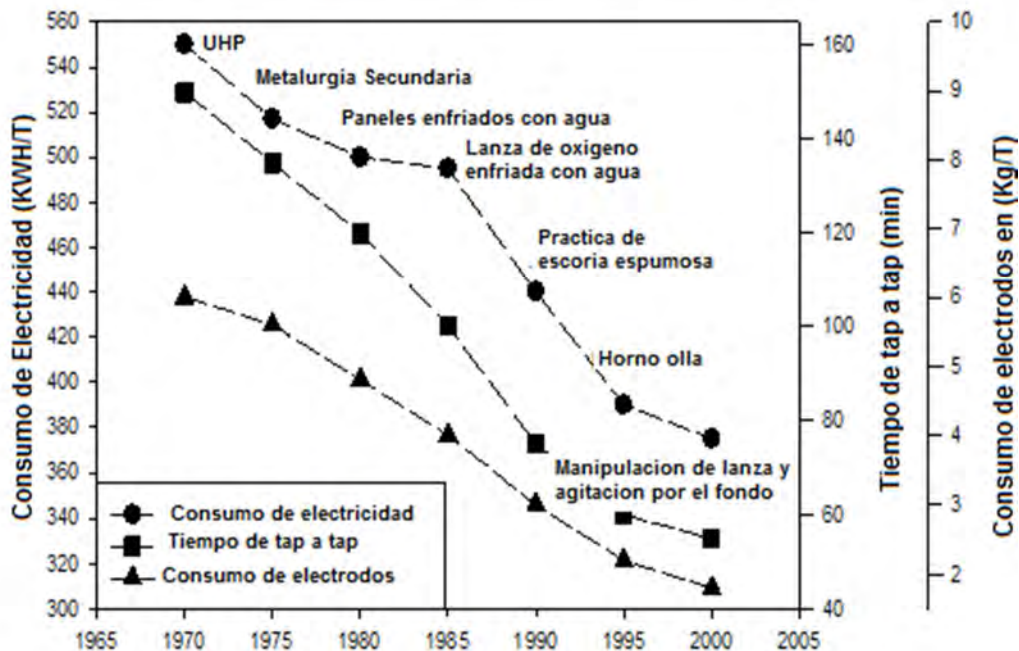


Figura 4. Evolución en el consumo de energía eléctrica y electrodos en el horno eléctrico de arco en función de los avances tecnológicos [5].

Por otra parte, la importancia del estudio del horno eléctrico de arco está en función del incremento de la producción de acero por este método, como se muestra en la **Figura 5** [6], en donde se aprecia que desde la década de los 70 del siglo pasado, se ha ido incrementando la producción de acero a través de esta tecnología y actualmente casi el 30% del total de acero producido mundialmente se fabrica en hornos eléctricos de arco, en parte por su bajo costo de instalación y por su gran flexibilidad en la carga de materias primas (carga desde chatarra, arrabio, DRI, etc). Además, algunas mejoras tecnológicas han promovido una gran evolución de este horno, reduciendo el consumo de energía eléctrica desde 600 KWh/ton (en 1970's) hasta los 330 KWh/ton actuales, o las 3 horas de proceso a los 35 minutos entre coladas actuales. Algunas de las mejoras tecnológicas

incluyen, el precalentamiento de chatarra, la postcombustión, el uso de escoria espumosa, los paneles enfriados con agua, los hornos de ultra alta potencia, el desarrollo de la refinación secundaria en el horno olla, entre otras.

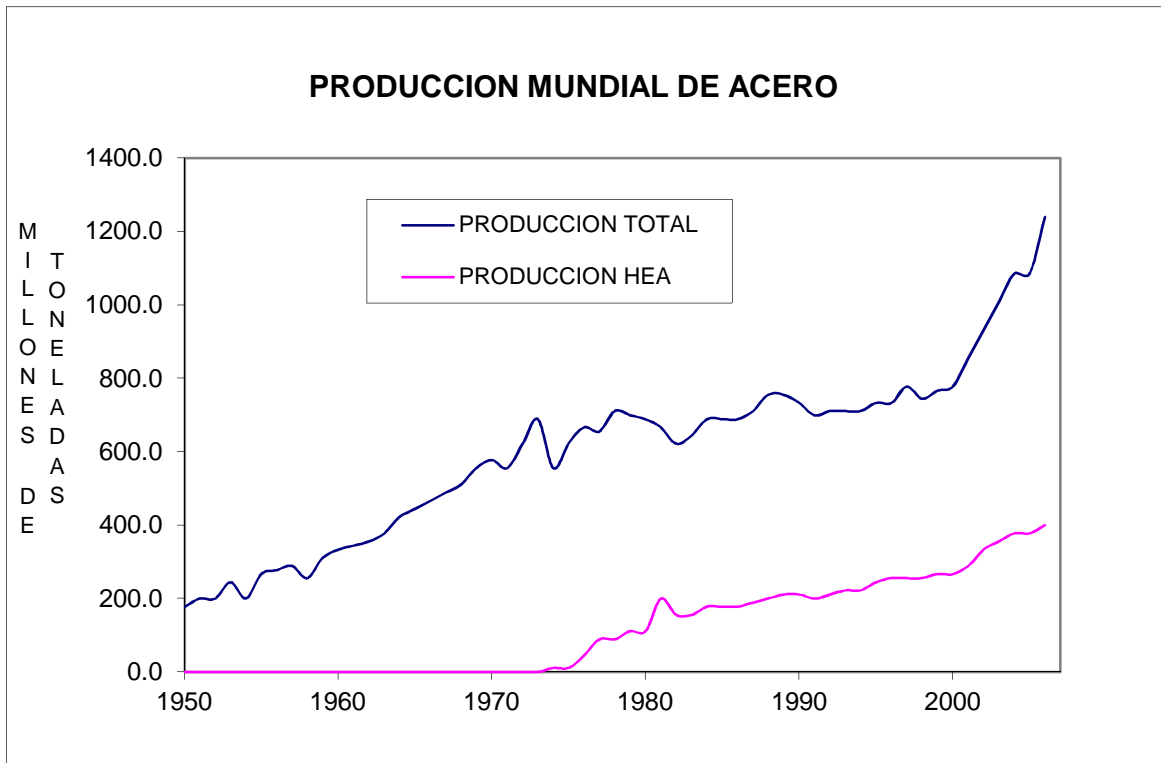


Figura 5. Aumento en la producción de acero en horno de arco eléctrico con respecto al total de la producción mundial [6].

El uso de oxígeno se ha incrementado en las últimas décadas porque promueve un menor consumo de energía eléctrica cara. La presencia de jets controlados de O_2 con finos de carbono forma la escoria espumosa que evita pérdidas de energía desde los arcos por radiación, reduciendo el consumo de energía eléctrica. A mayor consumo de O_2 , mayor es el ahorro de electricidad, aunque como se ve en la **Figura 6** [7] existe un consumo óptimo de O_2 arriba del cual se incrementa de nuevo el consumo de energía eléctrica. Un exceso de O_2 promueve una excesiva formación de FeO en la escoria que disminuye la estabilidad de la espuma y por lo tanto un incremento significativo en el contenido

de FeO en la escoria vuelve a descubrir los arcos, aumentando las pérdidas por radiación y el consumo de electricidad. También se reduce el tiempo de tap a tap, con lo que se incrementa la productividad y se reduce el consumo de electrodos. El uso de jets de oxígeno reduce hasta en 30% los costos de producción [7].

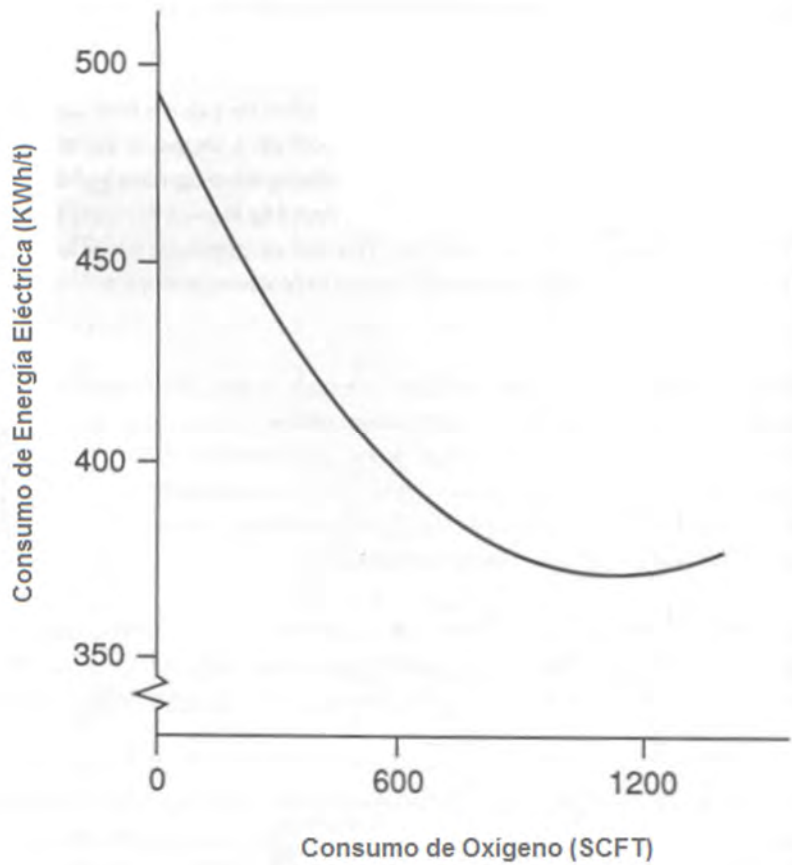


Figura 6. Consumo de energía eléctrica contra consumo de oxígeno [7].

1.1 HIPÓTESIS

El entendimiento de los fenómenos de transporte involucrados en las interacciones de jets de oxígeno sobre baños de acero es fundamental para mejorar y optimizar estas prácticas que a su vez redundará en un ahorro en el consumo de energía eléctrica. Uno de los primeros y más básicos aspectos a entender es el intercambio de momentum que existe entre el jet y el baño en un sistema bifásico acero-escoria. Es posible estudiar el fenómeno de transferencia de cantidad de movimiento cuando un chorro de gas incide sobre una superficie libre de un baño bifásico a través de modelado matemático usando el algoritmo numérico VOF y resolviéndolo numéricamente a través del CFD FLUENT. Tomando como referencia un modelo físico, el cual usa un baño de agua-keroseno y jets de aire para simular un baño bifásico acero-escoria y jets de oxígeno respectivamente.

1.2 OBJETIVOS

- Desarrollar un modelo matemático en 3D que describa la geometría de la cavidad en la superficie libre y los patrones de flujo causados por las interacciones entre un jet gaseoso y una superficie libre de dos líquidos inmiscibles (agua-keroseno), para simular un baño bifásico acero-escoria y jets de oxígeno respectivamente.
- Analizar el efecto del ángulo de incidencia del jet y del flujo de aire del jet sobre el tamaño de las cavidades formadas y los patrones de flujo establecidos en el líquido.
- Validar cualitativamente este modelo matemático comparando sus predicciones contra las predicciones de las correlaciones reportadas en la literatura.

1.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las operaciones metalúrgicas y la física gobernante en los jets que inciden sobre baños líquidos, ya ha sido estudiado con anterioridad por diversos investigadores, tal es el caso del trabajo de Ann V. Nguyen [8], en el cual se desarrolló un modelo matemático en 2D mediante el software computacional CFD FLUENT. Donde un jet gaseoso incide sobre un baño líquido (ver esquema de la **Figura 7**), con el propósito de estudiar el efecto de la velocidad de salida del jet y el efecto que existe entre la distancia del jet gaseoso y la superficie libre del líquido sobre el tamaño de las deformaciones de la superficie libre de líquido (ver **Figura 8**), así como los patrones de recirculación dentro del baño líquido (ver **Figura 9**). Su trabajo no incluye una validación apropiada y además representa solo una fase líquida y solo sirve para lanzas verticales en 2D, por lo que su aplicación a los sistemas de aceración en hornos eléctricos con lanzas inclinadas y en presencia de escoria es imposible.

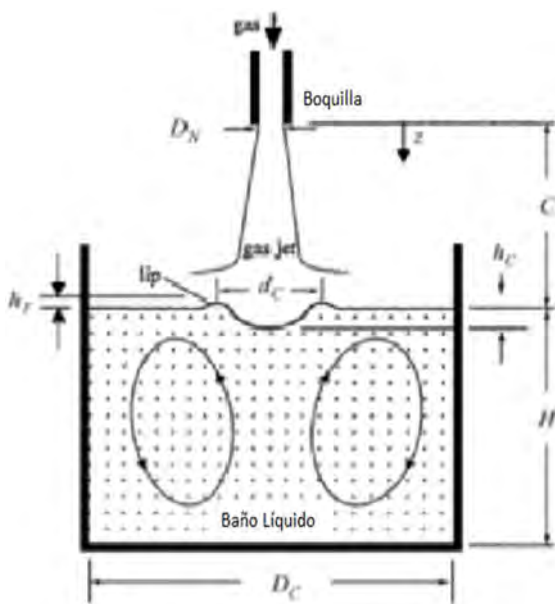


Figura 7. Esquema de un jet gaseoso incidiendo sobre un baño líquido [8].

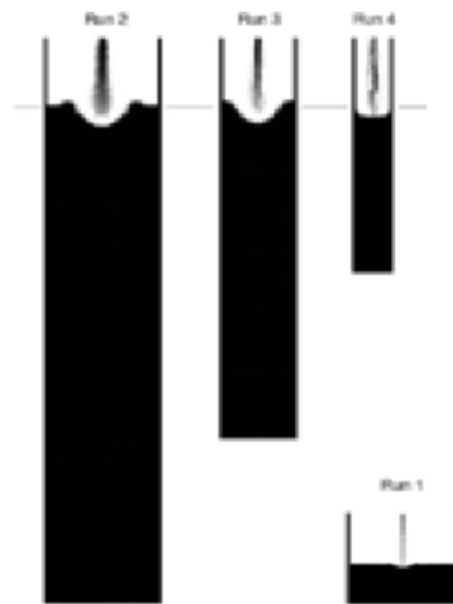


Figura 8. Tipos de deformación de la superficie libre [8].

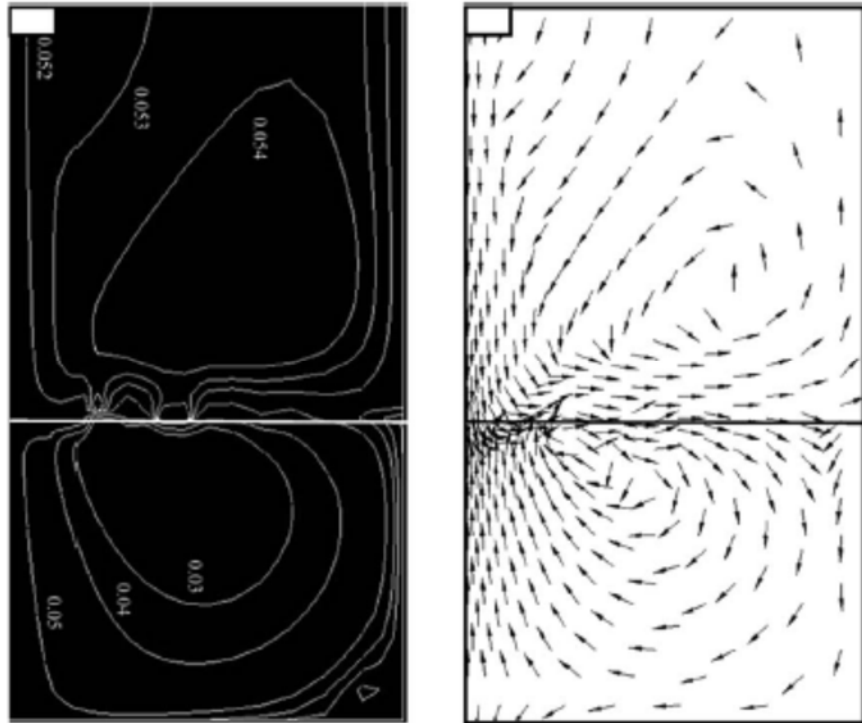


Figura 9. Función corriente (izquierda) y vectores de velocidad (derecha) [8].

Pär Jönsson y colaboradores [9], desarrollaron un modelo matemático en 2D con la ayuda de un software computacional CFD FLUENT, de un jet gaseoso incidiendo sobre una superficie libre de un baño líquido, en el cual el objetivo era comparar tres diferentes modelos de turbulencia ($k-\epsilon$ estándar, $k-\epsilon$ modificado, $k-\epsilon$ realizable). El modelo $k-\epsilon$ realizable es de reciente desarrollo y las diferencias principales con respecto al modelo $k-\epsilon$ estándar son una nueva formulación de la viscosidad turbulenta y una ecuación de transporte especial de la rapidez de disipación. La comparación de los modelos se hizo con el propósito de determinar qué modelo de turbulencia es el adecuado para este tipo de problema donde se hace incidir un jet gaseoso sobre una superficie libre de un baño líquido, teniendo como resultado que los modelos más apegados a los resultados obtenidos analítica o semi-analíticamente, son el modelo $k-\epsilon$ estándar y $k-\epsilon$ realizable.

Por su parte el investigador R. I. L. Guthrie y colaboradores [10], estudiaron el caso de un jet supersónico que incide en una superficie libre de un baño líquido. Para este estudio se realizó un modelo físico en el que las conclusiones más importantes a las que se llegaron son que la penetración de un chorro de gas en la superficie libre de un baño líquido depende de la velocidad de salida del gas en el jet, en donde a mayor velocidad de salida la penetración será mayor (ver **Figura 10**), asimismo, esa penetración también depende de la altura entre el jet y la superficie libre del baño líquido, de la forma de la boquilla del jet y de las propiedades físicas del líquido como lo son la densidad, que a medida que sea mayor la penetración disminuirá (ver **Figura 11**), además de su viscosidad y tensión superficial.

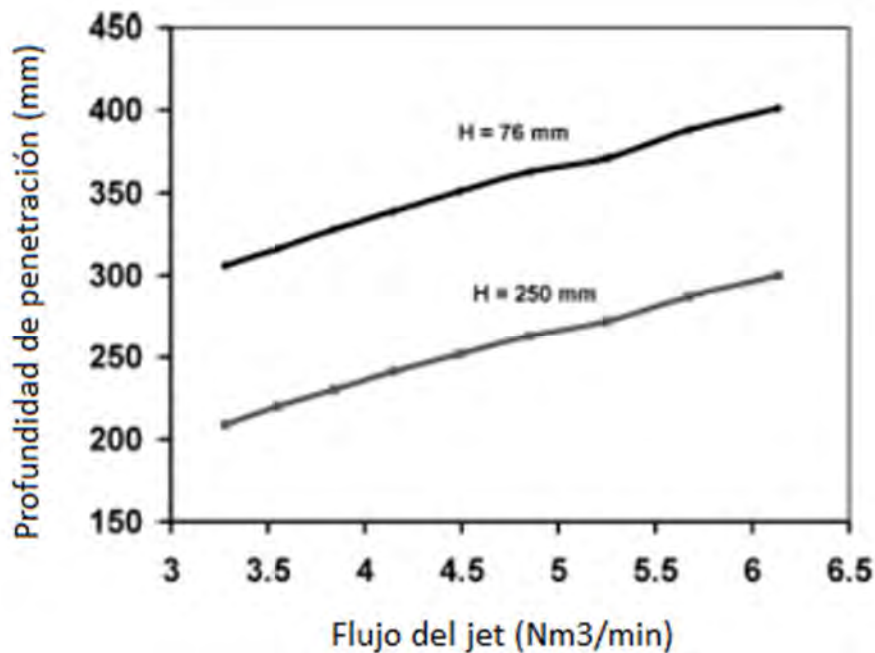


Figura 10. Efecto de la tasa de flujo en la penetración del jet [10].

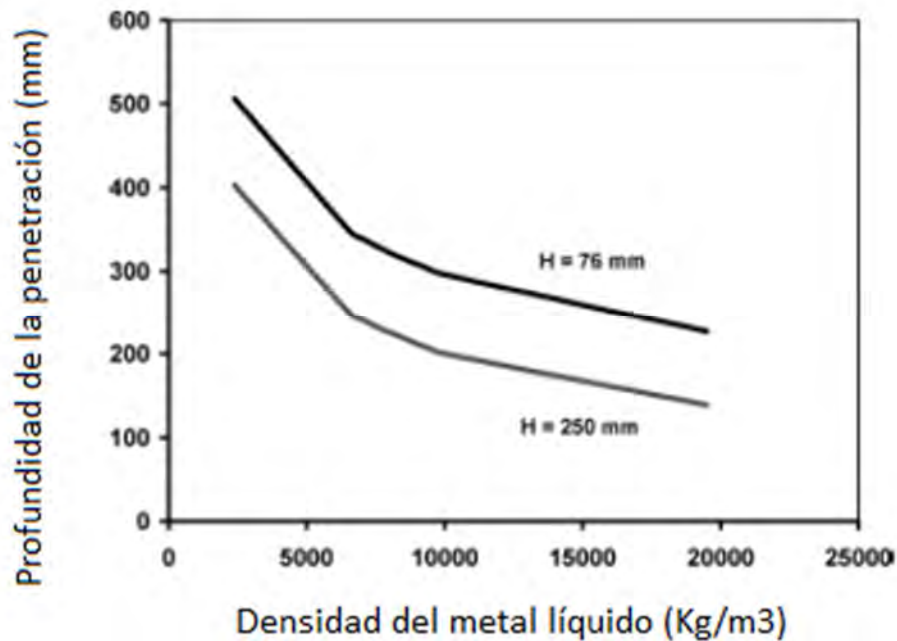


Figura 11. Efecto de la densidad del líquido en la penetración del jet [10].

J. Solórzano y colaboradores [11], presentaron un modelado físico, en el cual incide un jet gaseoso en un baño líquido, en el modelo físico se utilizó la técnica llamada PIV (Particle Image Velocimetry) donde se obtuvieron las imágenes de las depresiones formadas en el baño líquido y los vectores de velocidad del líquido en la zona afectada por el jet. El objetivo principal fue determinar las dimensiones de las cavidades formadas sobre el baño líquido y los vectores de velocidad de dicho baño en función del flujo de gas, de la distancia entre tobera y superficie libre, del diámetro de tobera y del ángulo de lanza. Las conclusiones más importantes señalan que los factores más importantes que afectan este fenómeno son el flujo de aire, la altura y el ángulo de la lanza (ver **Figuras 12 y 13**).

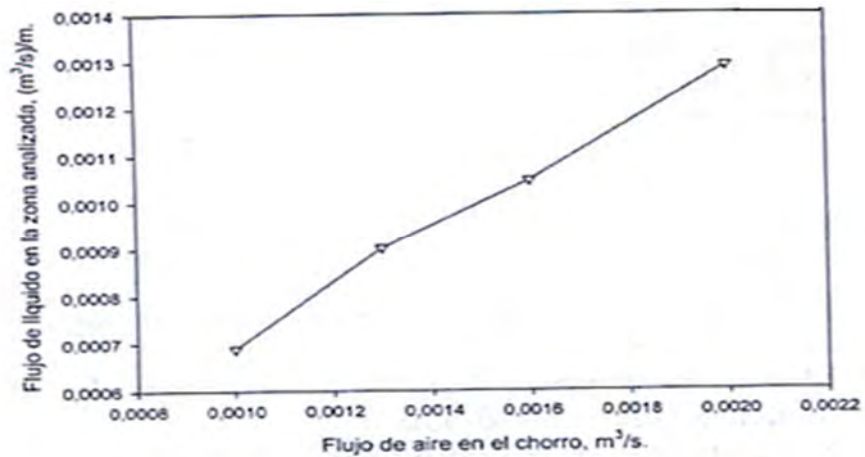


Figura 12. Flujo de agua como función del flujo de aire del chorro [11].

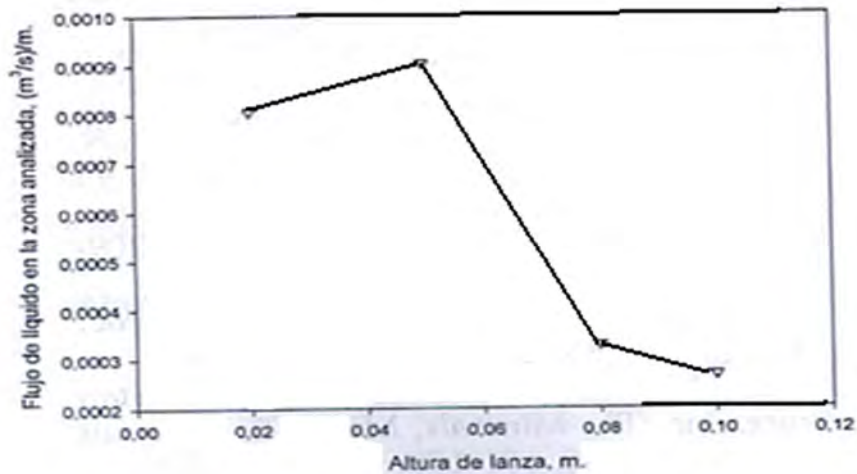


Figura 13. Flujo de agua como función de la altura vertical de lanza [11].

Por su parte Wakeline [12], en su tesis doctoral en la década de los 60's dio a conocer los resultados de las mediciones experimentales del campo de velocidades en agua afectadas por un jet de CO_2 (ver **Figura 14**), también se presenta un cálculo matemático realizado por Szekely [13] del mismo caso experimental de Wakeline (ver **Figura 15**). Wakeline realiza diversos estudios de jets que inciden sobre una superficie libre, donde las variables principales que él toma en cuenta son los distintos gases del jet y los líquidos en los cuales dichos jets inciden. De igual forma se rescata de esta tesis una correlación propuesta por dicho autor, que describe la profundidad adimensional de una cavidad formada por

la incidencia de un jet en una superficie libre líquida en función de otro número adimensional que está en función del momentum del jet.

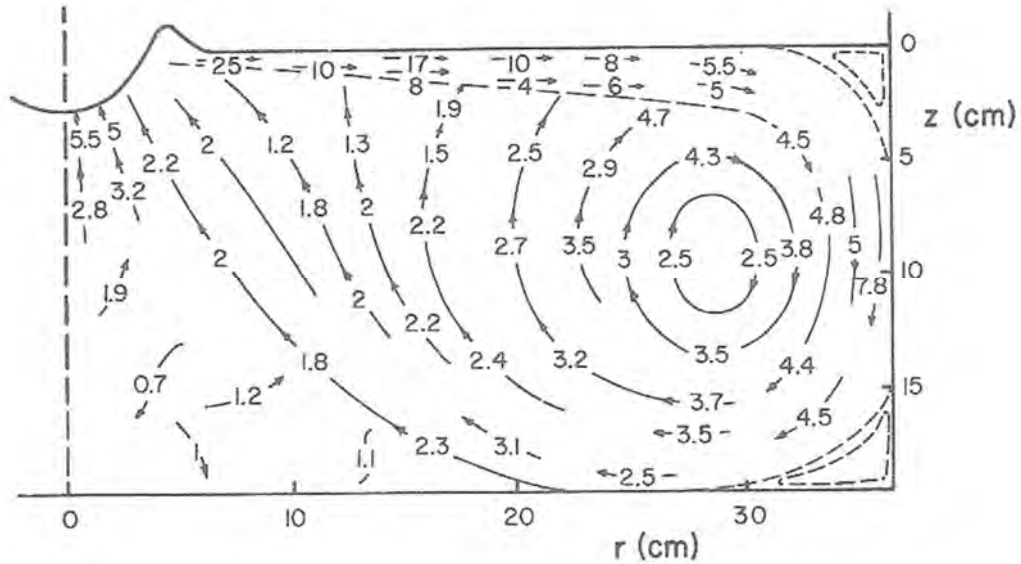


Figura 14. Mediciones experimentales de un campo de velocidades en el líquido afectado por la incidencia de un jet gaseoso [12].

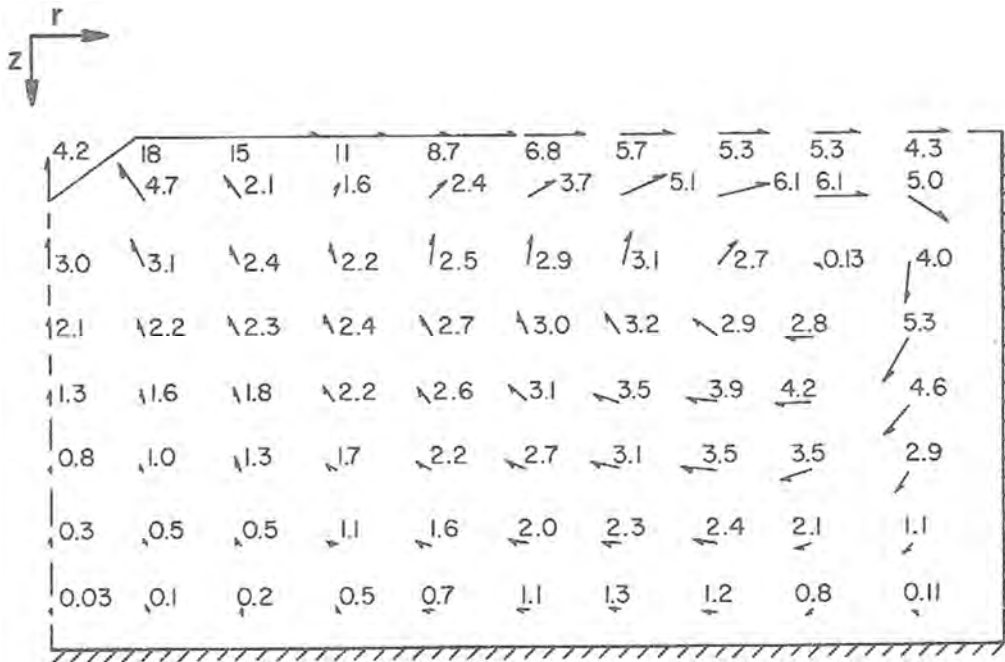


Figura 15. Cálculos realizados por Szekely que buscan reproducir las mediciones de la figura anterior [13].

Qian y colaboradores [14], con la ayuda de un modelo físico, determinaron las dimensiones de las cavidades formadas por la incidencia de un jet gaseoso sobre un baño líquido que contiene dos fases inmiscibles, que en este caso es agua y una pequeña capa de keroseno ó aceite de maíz para simular escoria. Se usan fotografías para determinar las dimensiones de la cavidad formada, además de identificar las condiciones a las cuales la capa de escoria se rompe por la acción del jet. Las variables principales que se involucran en este trabajo son el tipo de escoria, la altura de la lanza y el flujo de aire. Un aspecto muy interesante de este trabajo es que los autores reportan una correlación que describe la profundidad de penetración del jet en función de las variables de proceso tanto para casos con escoria y sin escoria, dicha correlación tiene una buena concordancia con las mediciones experimentales.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático con la ayuda de un software comercial FLUENTTM. El modelo matemático busca describir la geometría de la depresión formada por el jet gaseoso que incide sobre la superficie del baño bifásico así como los patrones de flujo desarrollados dentro del baño. Tomando como referencia un modelo físico, el cual usa un baño de agua-keroseno y jets de aire para simular un baño bifásico acero-escoria y jets de oxígeno respectivamente, se modela el sistema agua-keroseno aire.

2.1 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático fue desarrollado en FLUENTTMCFD, bajo las siguientes suposiciones:

1. Las fases presentes (gas y ambos líquidos) se consideran fluidos incompresibles y Newtonianos.
2. El perfil de velocidad del aire, que sale de la tobera se considera uniforme y con un valor constante.
3. Por consideraciones geométricas se pueden asignar algún o algunos planos de simetría.

2.2 ECUACIONES GOBERNANTES

Para el desarrollo de un modelo numérico de un chorro de gas que incide sobre una superficie libre, la literatura especializada nos recomienda el uso de una técnica o algoritmo numérico llamado Volume Of Fluid (VOF)[8,9]. Esta técnica es ampliamente utilizada para describir el flujo y la posición de la interface de dos o más fluidos inmiscibles. El problema de la superficie libre se plantea como un problema de flujo de una sola fase, que con la ayuda de una ecuación de conservación de una variable escalar o marcador, ξ , se determina el valor del

marcador en cada punto del dominio, el cual distingue a cada una de las fases presentes en ese punto del dominio, y en consecuencia las propiedades de ese fluido en ese punto.

2.2.1 Conservación de masa del marcador

La forma de la ecuación de conservación de masa del marcador está dada por la ecuación 1:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + v \cdot \nabla \xi = 0 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde v es el vector velocidad del fluido, y t es el tiempo. En la técnica VOF, las fracciones de volumen para cada fluido se determinan en cada celda. En este caso particular, con tres fluidos en el dominio, el valor del marcador, ξ , es la fracción de volumen de uno de los líquidos. En consecuencia la fracción del otro líquido es $1 - \xi_{líq1} - \xi_{gas}$, y la fracción del gas es $1 - \xi_{líq1} - \xi_{líq2}$, ya que la suma de todas las fracciones de volumen debe ser uno. Si ξ_{gas} tiene un valor de uno, indica la presencia de gas en el nodo, mientras que un valor de cero indica la presencia de uno o dos líquidos, y un valor entre cero y uno define la mezcla de gas y líquido y la presencia de la superficie libre entre el gas y el baño. Conociendo el valor de ξ de dos de las tres fases en un nodo, las propiedades del fluido se pueden calcular como un promedio ponderado de las fracciones en volumen de cada fase. Por ejemplo la densidad promedio de la mezcla en un nodo (ecuación 2), se puede calcular como:

$$\rho = \rho_g (1 - \xi_{líq1} - \xi_{líq2}) + \rho_{líq1} (1 - \xi_{gas} - \xi_{líq2}) + \rho_{líq2} (1 - \xi_{líq1} - \xi_{gas}) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

Donde ρ_g es la densidad del gas, $\rho_{líq1}$ es la densidad de uno de los líquidos y $\rho_{líq2}$ es la densidad del otro líquido.

2.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento del fluido

En forma vectorial, la ecuación de conservación de movimiento para un fluido newtoniano (ecuación 3) puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v) = -\nabla(P) + \nabla[\mu\Delta(v)] + \rho g \dots\dots\dots \text{(Ecuación 3)}$$

Donde P es la presión, g es la constante gravitacional y μ es la viscosidad media (calculada para cada nodo, de forma similar al cálculo de la densidad de la ecuación 2).

2.2.3 Modelo k-ε de turbulencia

Para describir la turbulencia del sistema, se utilizó el modelo de dos ecuaciones k-ε estándar[15], donde se obtiene la energía cinética turbulenta (ecuación 4), k , y su tasa de disipación (ecuación 5), ϵ , a partir de:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \dots\dots\dots \text{(Ecuación 4)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \dots\dots \text{(Ecuación 5)}$$

Donde G_k representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, G_b representa la generación de energía cinética turbulenta debido a la fuerza boyante, Y_M representa la contribución de la dilatación de las fluctuaciones de la turbulencia comprensible a la tasa de disipación, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes, σ_k y σ_ϵ son números de Prandtl

turbulentos para k y ϵ respectivamente, mientras que S_k y S_ϵ son usados para definir el termino fuente.

La viscosidad turbulenta, μ_t , se calcula mediante la combinación de k y ϵ de la siguiente manera:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 6)}$$

Donde C_μ es una constante.

2.2.4 Ecuación general de conservación

Todas las ecuaciones de conservación en el modelo de este trabajo siguen la forma de la ecuación de conservación general (ecuación 7), que se representa como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho v\phi) = \nabla(\Gamma_\phi \Delta\phi) + S_\phi \dots\dots\dots \text{(Ecuación 7)}$$

Donde Γ_ϕ es el coeficiente de difusión y S_ϕ es el término fuente. La ecuación general de conservación consiste en los siguientes términos: término transitorio, transporte convectivo de ϕ , transporte difusivo de ϕ y el termino fuente que se utiliza para incluir todos los términos que no se pueden insertar en los términos anteriores.

2.2.5 Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas en función de los gradientes de velocidad para un fluido newtoniano de ρ y μ constantes se presentan a continuación [16]:

- Componente r

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$+ \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 8)}$$

- Componente θ

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

$$+ \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 9)}$$

- Componente z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z}$$

$$+ \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 10)}$$

2.2.6 Fuerzas involucradas en la formación de la depresión

El balance de fuerzas que gobierna la formación de la depresión en el sistema son: 1) la fuerza de inercia que tiene el jet de aire al incidir en la superficie libre y que provoca la depresión; 2) La fuerza de gravedad que actúa sobre el

líquido y que se opone a la formación de la depresión; y 3) La fuerza de tensión superficial entre el líquido y el gas que también se opone a la formación de la depresión. Y este balance se puede escribir de la siguiente manera:

$$(\rho_l gh') + \left(\frac{2\sigma}{R_o} \right) = \frac{1}{2} (\rho_g V_g^2) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 11)}$$

Fuerza de gravedad + Fuerza de tensión superficial = Fuerza de inercia del jet

Donde V_g es la velocidad del jet, h' es la profundidad de la depresión, ρ_l es la densidad del líquido, ρ_g es la densidad del gas, R_o es el radio de curvatura de la depresión, g es la gravedad y σ es la tensión superficial.

Este balance de fuerzas se puede representar con números adimensionales como lo son el número de Weber (We), el de Froude (Fr), y el de Reynolds (Re) que se presentan a continuación:

$$We = \frac{(\rho_g R_o V_g^2)}{\sigma} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 12)}$$

$$Fr = \frac{V_g^2}{gh'} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 13)}$$

$$Re = \frac{(LV_g \rho_g)}{\mu_g} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 14)}$$

Donde L es el diámetro a través del cual circula el fluido o la longitud característica del sistema y μ_g es la viscosidad cinemática del fluido.

2.3 CONDICIONES DE FRONTERA

Para poder resolver el modelo matemático, es necesario definir las condiciones a la frontera y las condiciones iniciales de este sistema. Una representación esquemática del sistema se muestra en la **Figura 16**, donde se aprecian los dos líquidos contenidos por un recipiente cilíndrico y el jet gaseoso que se basa en la representación de un modelo físico de un sistema oxígeno-escoria-acero y las fronteras del sistema que se describen a continuación.

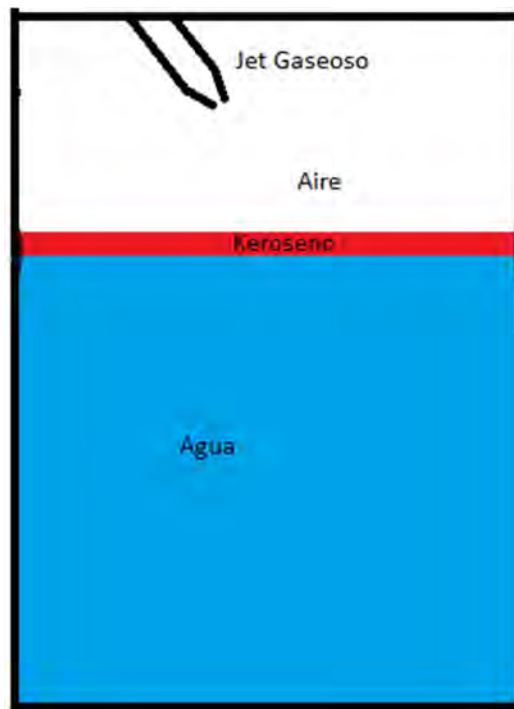


Figura 16. Representación esquemática del sistema de estudio.

2.3.1 Paredes

Las paredes son sólidos impermeables (cilindro y fondo), con condición de no deslizamiento y turbulencia igual a cero, las velocidades, k y ϵ son cero. Además se utilizan las llamadas funciones pared para describir los perfiles de velocidad de la región con turbulencia a la región laminar cercana a las paredes.

2.3.2 Simetría

Debido a las características geométricas del recipiente y la ubicación de la lanza, es posible definir un plano de simetría. Las simetrías son consideradas como flujo igual a cero, tanto para la transferencia de masa como para la transferencia de la cantidad de movimiento.

2.3.3 Fronteras abiertas

Este límite se encuentra en la parte superior del recipiente y está abierto a la atmosfera. Por lo tanto la presión en este límite se fija al valor de la presión de la atmosfera. Debido a esto, el flujo hacia adentro o hacia afuera del recipiente es posible y la masa que entre o salga del sistema depende del balance de masa.

2.3.4 Chorro de gas de entrada

En la punta de la boquilla, donde sale el chorro de gas, la magnitud de la velocidad es uniforme, y los componentes de la velocidad se establecen de acuerdo al ángulo de la lanza, mientras que los parámetros turbulentos k y ϵ en la punta de la boquilla se evalúa de la siguiente forma:

2.3.4.1 Energía cinética turbulenta

La ecuación que describe la energía cinética turbulenta [14] es:

$$k = 1.5(V_m I)^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 15)}$$

Donde V_m es la magnitud de velocidad en la boquilla, e I es la intensidad de turbulencia definida por:

$$I = 0.16(\text{Re})^{-0.125} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 16)}$$

Donde Re es el número de Reynolds.

2.3.4.2 Rapidez de disipación de la energía cinética turbulenta

$$\varepsilon = 0.164 \frac{k^{1.5}}{l} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 17)}$$

Donde k es la energía cinética turbulenta, e l es la escala de longitud de la turbulencia, que se considera como el 7% del diámetro de la boquilla [14].

2.3.5 Intercara gas/liquido o superficie libre

La deformación de la intercara gas-liquido se acopló con el salto de presión en la zona de interfase por medio de la ecuación de Laplace:

$$p_l - p_g = \sigma \nabla (\bar{n} / |\bar{n}|) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 18)}$$

Donde p_l y p_g son las presiones en los dos fluidos en cada lado de la interfase y σ es la tensión superficial. El término entre paréntesis de lado derecho de la ecuación 8 describe la curvatura local de la intercara, siendo n el vector normal a la superficie de la interfase y se relaciona a la fracción volumen de la fase liquida por la siguiente ecuación:

$$\bar{n} = \Delta(\xi) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 19)}$$

2.4 CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales de este problema en estado transitorio consisten en dos líquidos inmiscibles quietos y sin la acción del jet gaseoso, es decir todas las velocidades y parámetros turbulentos inician con valores de cero.

2.5 PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas del agua, aire y keroseno empleadas en este estudio se presentan en la Tabla 1.

Sustancia	Densidad (Kg/m ³)	Viscosidad (Kg/ms)
Agua	1000	1.003e ⁻³
Aire	1.225	1.85e ⁻⁵
Keroseno	780	2.4e ⁻³

Tabla 1. Propiedades físicas de los fluidos.

2.6 METODOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

El problema planteado en la sección anterior no posee solución analítica y la única manera de resolverlo es numéricamente, para lo cual fue necesario construir una representación del sistema usando el software comercial GAMBIT 2.2.3. Se trata de la mitad de un recipiente cilíndrico (por simetría) con una altura de 0.3 m y un diámetro interno de 0.2 m.

La construcción de la geometría del sistema inicia colocando puntos donde estarían los vértices del semicilindro y posteriormente estos puntos se unieron por medio de líneas rectas y segmentos de arco. El siguiente paso fue conformar áreas a partir de los segmentos rectos y curvos para con ellas construir volúmenes como se muestra en la **Figura 17**. El objetivo de conformar estos volúmenes es situar la posición de las fases presentes en el sistema.

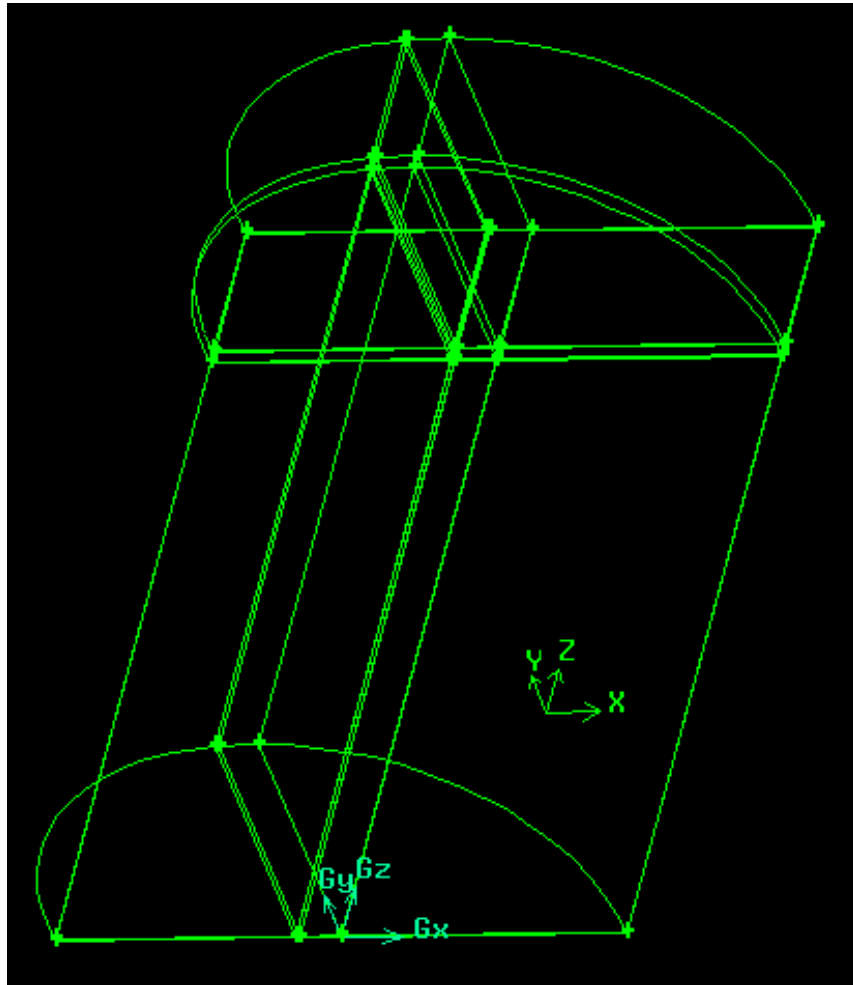


Figura 17. Geometría del sistema a partir de los volúmenes generados.

Después de haber construido los volúmenes que conforman el sistema (**Figura 17**), se procedió a realizar la discretización del sistema. Para esto, las líneas que forman los volúmenes fueron divididas en varios segmentos, poniendo atención en las regiones en donde el jet iba a incidir, para que en éstas, la malla resultante fuese lo más fina posible, como se muestra en la **Figura 18**. La malla cuenta con un total de 45012 nodos.

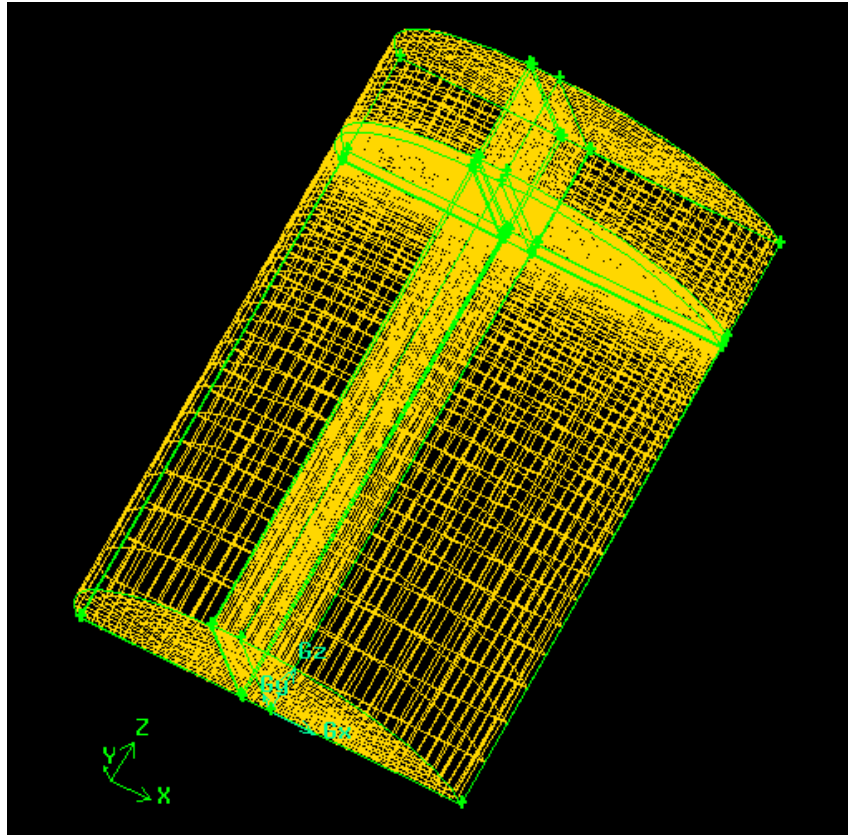


Figura 18. Discretización del sistema.

Por último, se procedió a declarar las condiciones de frontera del sistema en GAMBIT, que corresponden a áreas en el sistema, y que se detallaron anteriormente.

Para este sistema en específico tenemos que los límites del dominio computacional están dentro de la mitad de un recipiente cilíndrico (por simetría) que contiene una cantidad de un líquido a un nivel determinado, por encima de este, se encuentra otro líquido a un nivel determinado y el resto del recipiente contiene aire que se encuentra expuesto a la atmosfera. Los límites o fronteras son las paredes del recipiente, el fondo, un plano de simetría y la frontera abierta a la atmosfera. La **Figura 19** muestra el sistema y las condiciones de frontera

implementadas en el software comercial GAMBIT 2.2.3 que es el preprocesador de FLUENT.

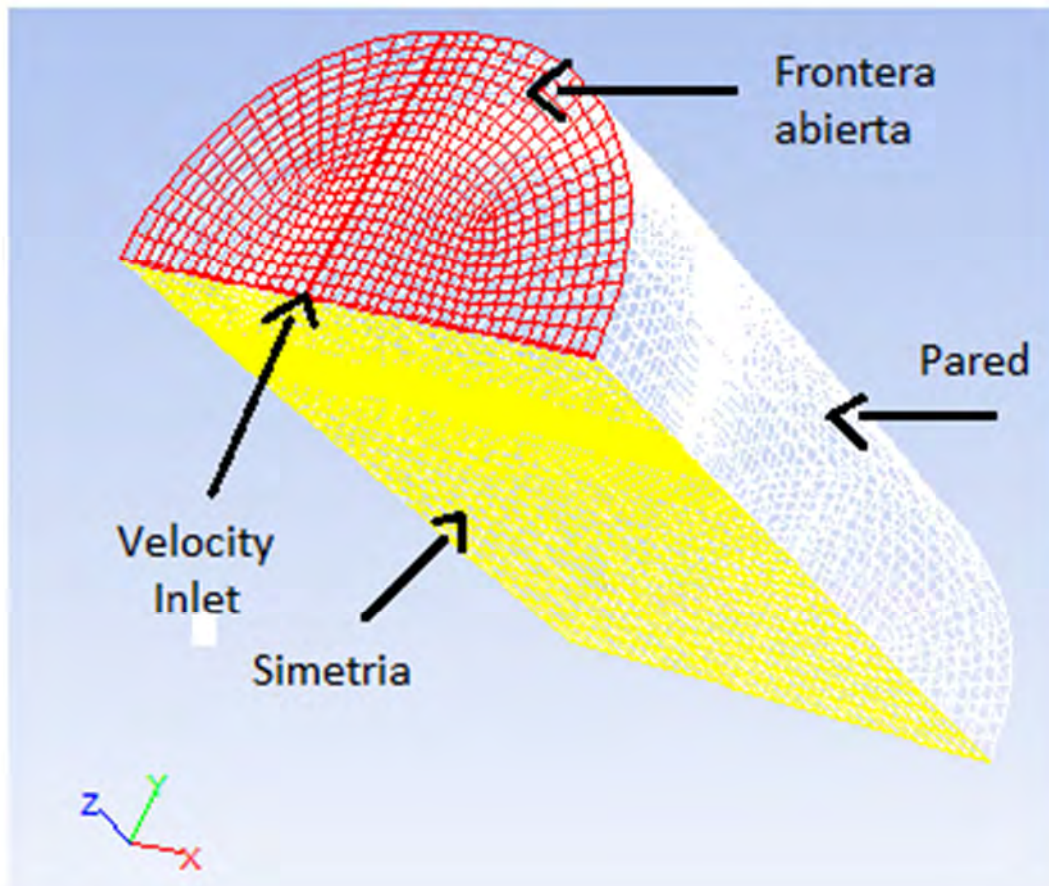


Figura 19. Condiciones de frontera implementadas en GAMBIT.

2.7 VARIABLES Y NÚMERO DE CÁLCULOS

Las variables que se consideran en este estudio son flujo de gas y ángulo de lanza. Este trabajo consta de nueve cálculos con flujos de gas de: 60 l/min, 80 l/min y 100 l/min; y ángulos de lanza de: 50°, 60° y 75 °. Las características de cada cálculo se presentan en la Tabla 2.

Número de cálculo	Flujo de gas (l/min)	Ángulo de lanza (grados)
1	60	50
2	80	50
3	100	50
4	60	60
5	80	60
6	100	60
7	60	75
8	80	75
9	100	75

Tabla 2. Condiciones para cada cálculo.

2.8 SOLUCIÓN NUMÉRICA

El modelo matemático fue resuelto en un código comercial de la dinámica de los fluidos computacional ANSYS FLUENT™ 12.0.16. Las simulaciones fueron llevadas a cabo en una computadora WorkStation Dell™ T3400, con procesador Core 2 Duo. Se desarrolla una malla tridimensional no uniforme para representar el dominio computacional. Se toma en cuenta una distribución de la malla más fina en las interfaces presentes líquido-líquido y líquido-gas, con el objetivo de observar a detalle la deformación de estas superficies libres. Se usó la técnica numérica VOF para seguir la deformación de la superficie causada por la incidencia del jet así como el esquema geo-reconstruct.

Como ya se mencionó, el modelo de turbulencia aplicado es el $k-\epsilon$ estándar. La presión de referencia se fijó en una atmosfera, ya que el recipiente se encuentra libre a la atmosfera y la acción gravitacional se aplicó en el eje coordenado z . Las condiciones de frontera aplicadas ya se mencionaron previamente y su implementación en el código FLUENT implicó lo siguiente:

- 1) Paredes. Estacionarias, con la llamada wall-function, la instrucción en código FLUENT para esta condición de frontera es "Wall".
- 2) Simetría. Un plano de simetría dada la geometría del sistema. En el código usado se denomina como "Symmetry".
- 3) Frontera abierta. Se usó el tipo de condición de frontera de "PressureOutlet" que requiere un valor numérico de presión estática relativa, que fue fijado en una atmosfera, asumiendo que el recipiente está abierto a la atmosfera.
- 4) El Jet involucra la entrada de gas en el sistema. La condición de frontera usada fue "Velocity Inlet", con las características ya descritas anteriormente, para el cálculo de la energía cinética turbulenta y la rapidez de disipación de la misma. Para lograr el ángulo de inclinación de incidencia del jet, se usaron las componentes trigonométricas de la velocidad con el ángulo deseado.

Para realizar la interpolación de los valores de presión en las caras de los nodos por medio de la ecuación de momentum se aplicó el esquema PRESTO! (Pressure Staggering Option), el cual usa un balance discreto de masa para un volumen de control escalonado respecto a una cara del mismo para calcular la presión en esta cara. Las presiones y velocidades fueron acopladas usando el algoritmo PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Este esquema es parte de la familia SIMPLE de algoritmos y se basa en el alto grado de aproximación entre las correcciones para presión y velocidad. Una de las limitaciones de este tipo de algoritmos es que a nuevas velocidades y sus correspondientes fluxes no se satisface el balance de momentum después de resolver la ecuación de corrección de presión. Por esto, el cálculo se debe repetir

hasta que se satisfaga el balance de momentum y el de masa. Para mejorar la eficiencia de este cálculo, el algoritmo PISO lleva a cabo dos correcciones adicionales, la corrección por proximidad (neighbor correction) y la corrección por distorsión (skewness correction).

La presencia de los tres fluidos (agua, aire y keroseno) en el sistema bajo estudio al inicio se determinó describiendo las coordenadas de la región en la cual hay agua y estableciendo en este volumen la presencia de una región (“patch”) de esta sustancia, de la misma manera se creó otra región para tomar en cuenta la presencia de keroseno, mientras que el resto del volumen bajo estudio es aire.

Los resultados de los cálculos presentados en este trabajo se muestran desde el tiempo inicial hasta un segundo, en intervalos de 0.1 segundos. Esto se debe principalmente a que después de un segundo las variaciones en el sistema en cuanto a la geometría de la cavidad y los patrones de flujo dentro del baño no cambian de forma significativa, esto se pudo comprobar corriendo dos casos hasta un tiempo de 10 segundos y comprobando que las características del sistema se mantienen prácticamente iguales, es decir se alcanzan condiciones estacionarias. Cada cálculo requiere de un tiempo de computadora de aproximadamente 10 horas. En la mayoría de los casos se usó un paso de tiempo de 1×10^{-4} segundos. La lanza se encuentra a una altura de 0.05 metros por encima de la superficie libre y se mantiene constante, la abertura de la boquilla de la tobera es de 1.58 mm e igualmente se mantiene constante, mientras que las variables del sistema son los ángulos de incidencia del jet y los flujos de salida del jet gaseoso (**Figura 20**).

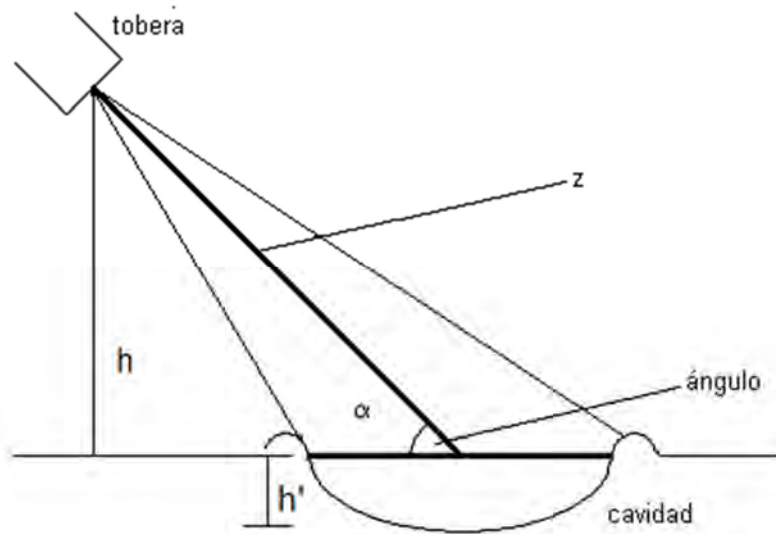


Figura 20. Esquema de la altura y ángulo de la incidencia del jet.

Una vez realizado el cálculo, fue necesario procesar las imágenes resultantes de los cálculos con FLUENT™, donde se muestran la superficie de las fases líquidas con la deformación causada por la incidencia del jet de aire, los vectores velocidad y la recirculación del sistema. Estas imágenes fueron editadas con el propósito de observar a detalle tanto las fases presentes, los vectores de velocidad y la recirculación del sistema y se mostrarán en el capítulo de resultados.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para realizar un análisis de resultados del modelo matemático descrito con anterioridad, primero se debe validarlo. Esta validación se da al comparar los resultados obtenidos con este modelo matemático contra resultados de un modelo físico, reportados en la literatura o bien correlaciones teóricas encontradas en la literatura que describen ciertos aspectos del fenómeno que se busca describir.

3.1 MODELO MATEMÁTICO

Este trabajo no desarrolló un modelo físico con el que se pueda validar al modelo matemático y los modelos físicos reportados en la literatura son en su mayoría baños compuestos por una sola fase, por lo que se optó por validar nuestro modelo a través de una correlación empírica que describe la profundidad adimensional de las cavidades resultantes en dicho fenómeno. Esta correlación fue hecha por D. H. Wakelin en su tesis doctoral en la época de los 60's[12].

3.1.1 Correlación empírica de Wakelin

Esta relación empírica describe la profundidad adimensional de la cavidad como función de la cantidad de movimiento del chorro de gas [12] (**Figura 20**), la densidad del líquido y la altura entre la tobera y el baño líquido (ecuación 20).

$$\left(\frac{h'}{z}\right)\left(\frac{h'+z}{z}\right)^2 = K\left(\frac{J_z}{g^* \rho_L^* z^3}\right)^n \dots\dots\dots \text{(Ecuación 20)}$$

Donde h' es la profundidad de la cavidad, z es la longitud que recorre el chorro de aire desde la tobera hasta el baño líquido, J_z es la rapidez de transferencia de cantidad de movimiento del chorro gaseoso, y g es la constante gravitacional, mientras que K y n son constantes a determinar.

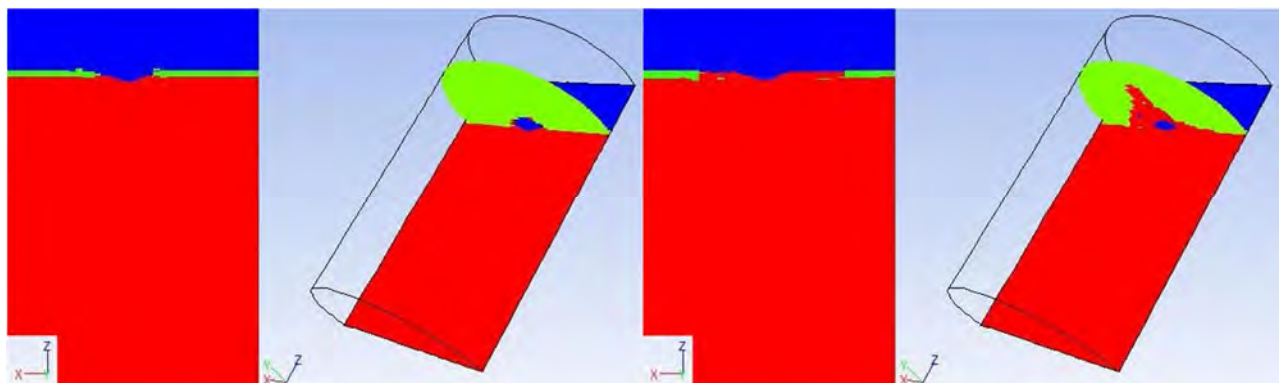
La rapidez de transferencia de cantidad de movimiento J_z se determina de la siguiente forma (Ecuación 21):

$$J_z = \frac{\left[\frac{w}{0.404 * z} \right]^2}{\rho_{aire}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 21)}$$

Donde w es el flujo de gas en (kg/s), z es la distancia que recorre el chorro de aire desde la tobera hasta el baño líquido en (m) y ρ es la densidad del aire en (Kg/m³).

3.1.2 Fases presentes y ubicación dentro del sistema

Las fases presentes y su ubicación a 0.1, 0.5 y 1.0 segundo de activado el chorro de gas, se muestran en la **Figura 21** con 60 l/min y ángulo de lanza de 50°, **Figura 22** con 80 l/min y ángulo de lanza de 50°, **Figura 23** con flujo de 100 l/min y ángulo de lanza de 50°, **Figura 24** con 100 l/min y ángulo de lanza de 60° y **Figura 25** con 100 l/min y ángulo de lanza de 75°. En todos los casos se muestra la presencia de tres fases (aire en color azul, keroseno en color verde y agua en color rojo). Cada figura muestra una imagen transversal del cilindro (izquierda), y una imagen que nos muestra el sistema inclinado con el mismo plano transversal y un plano horizontal en que se encuentra en la capa de keroseno (derecha).



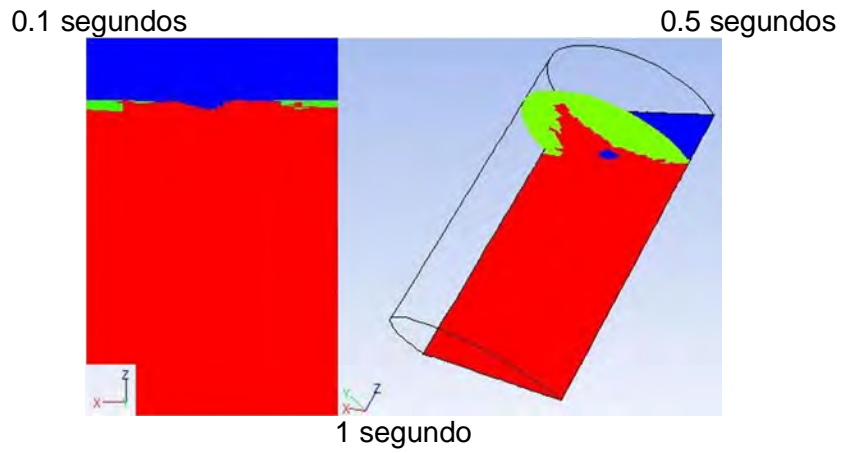


Figura 21. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 60 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.

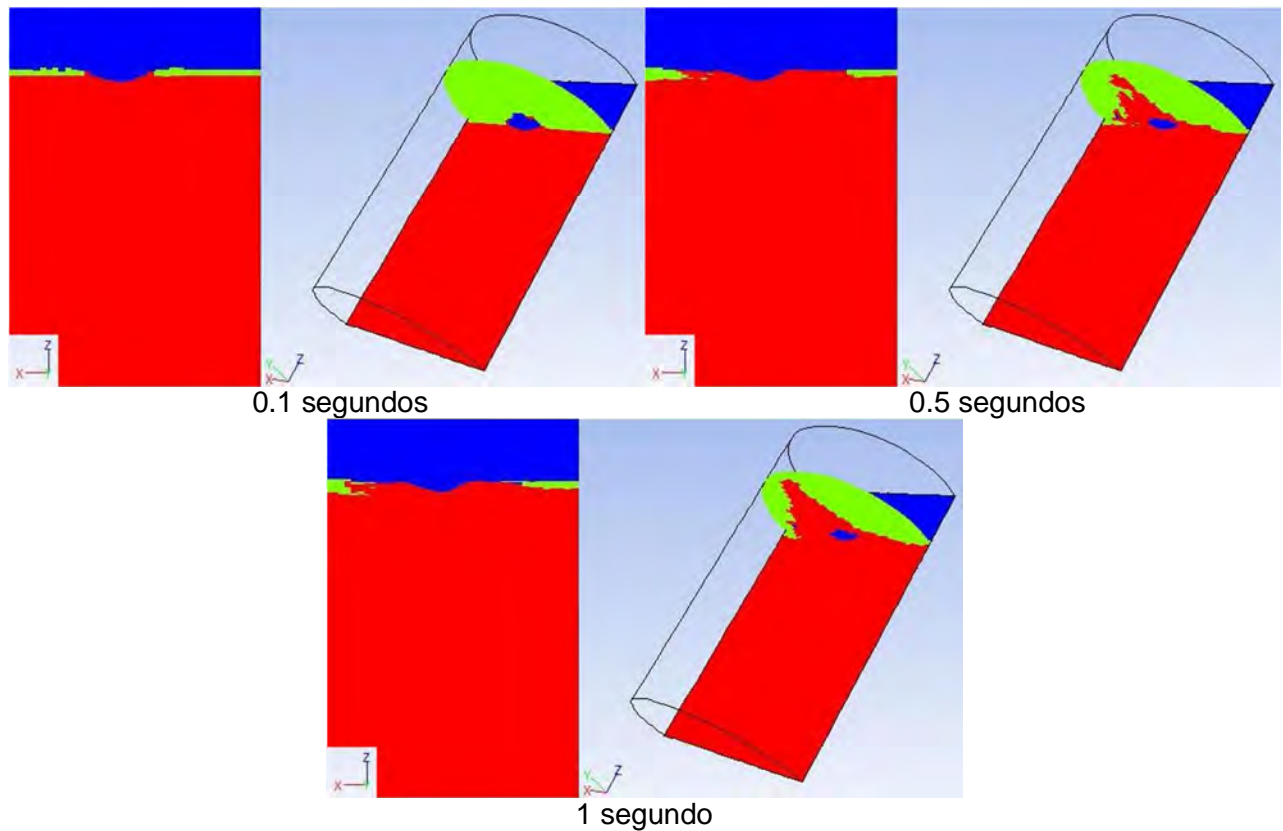


Figura 22. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 80 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.

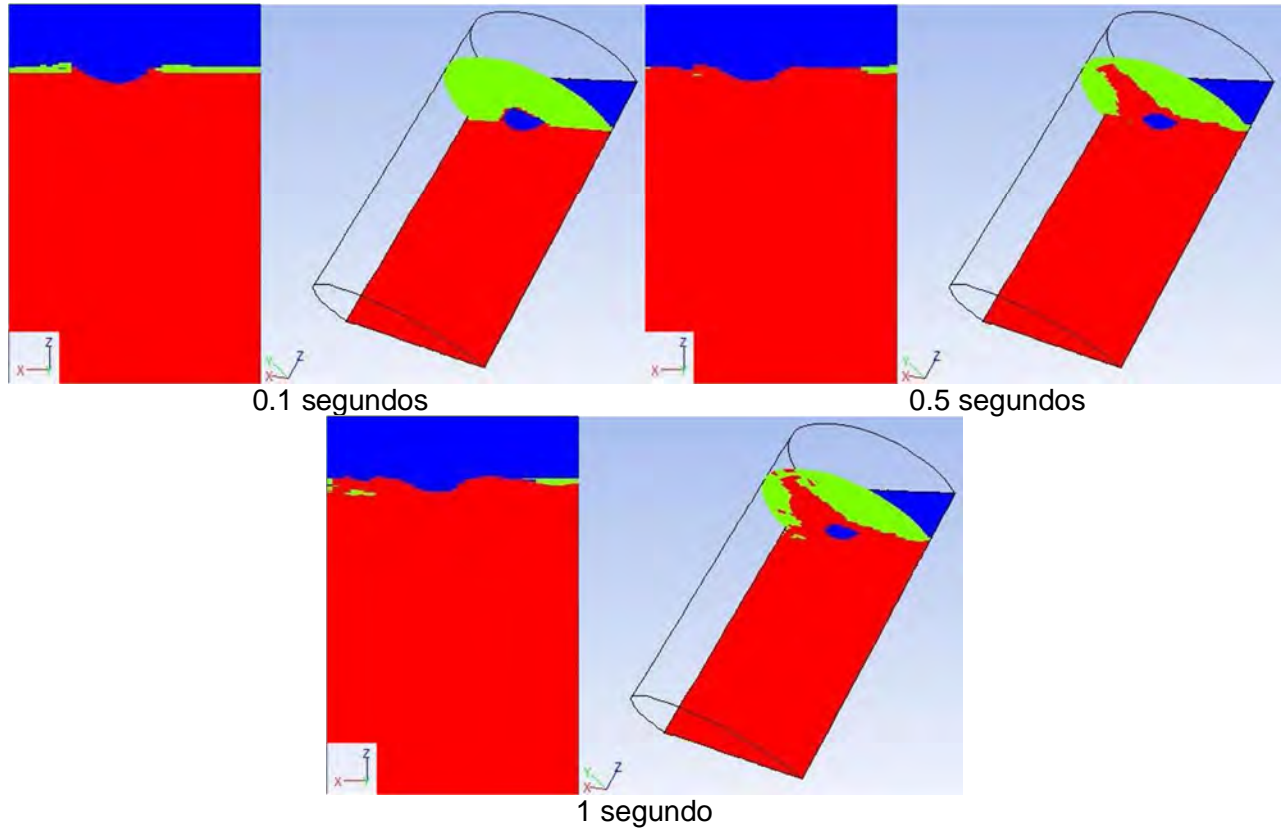
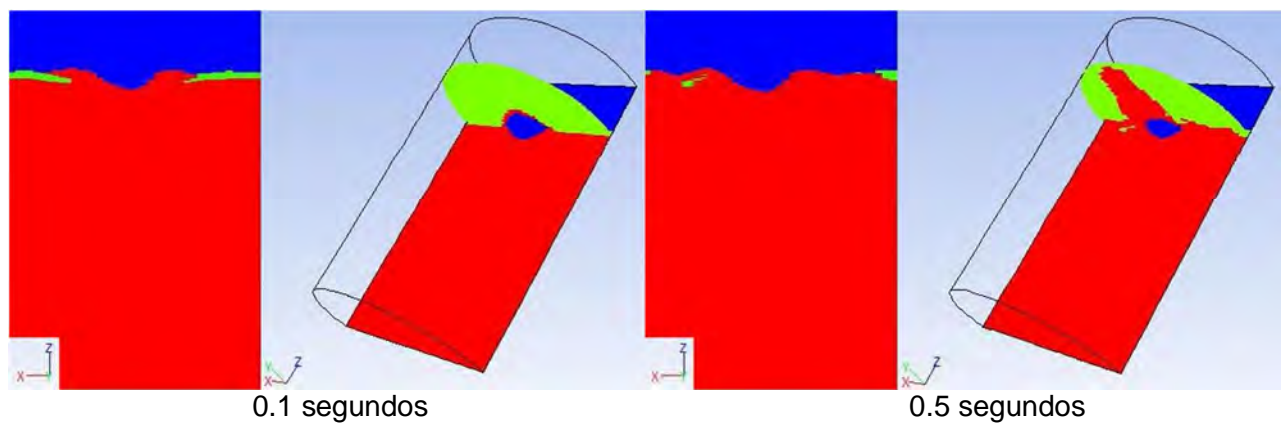
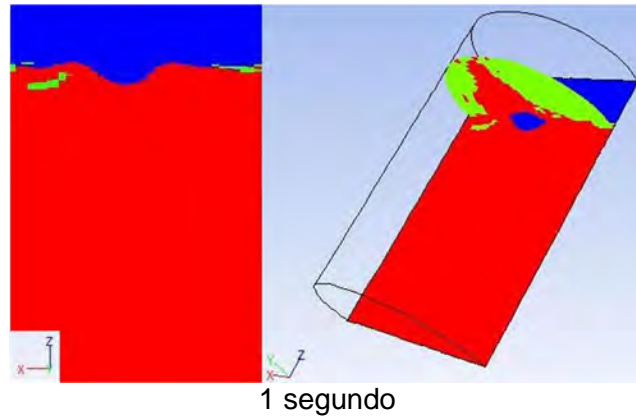


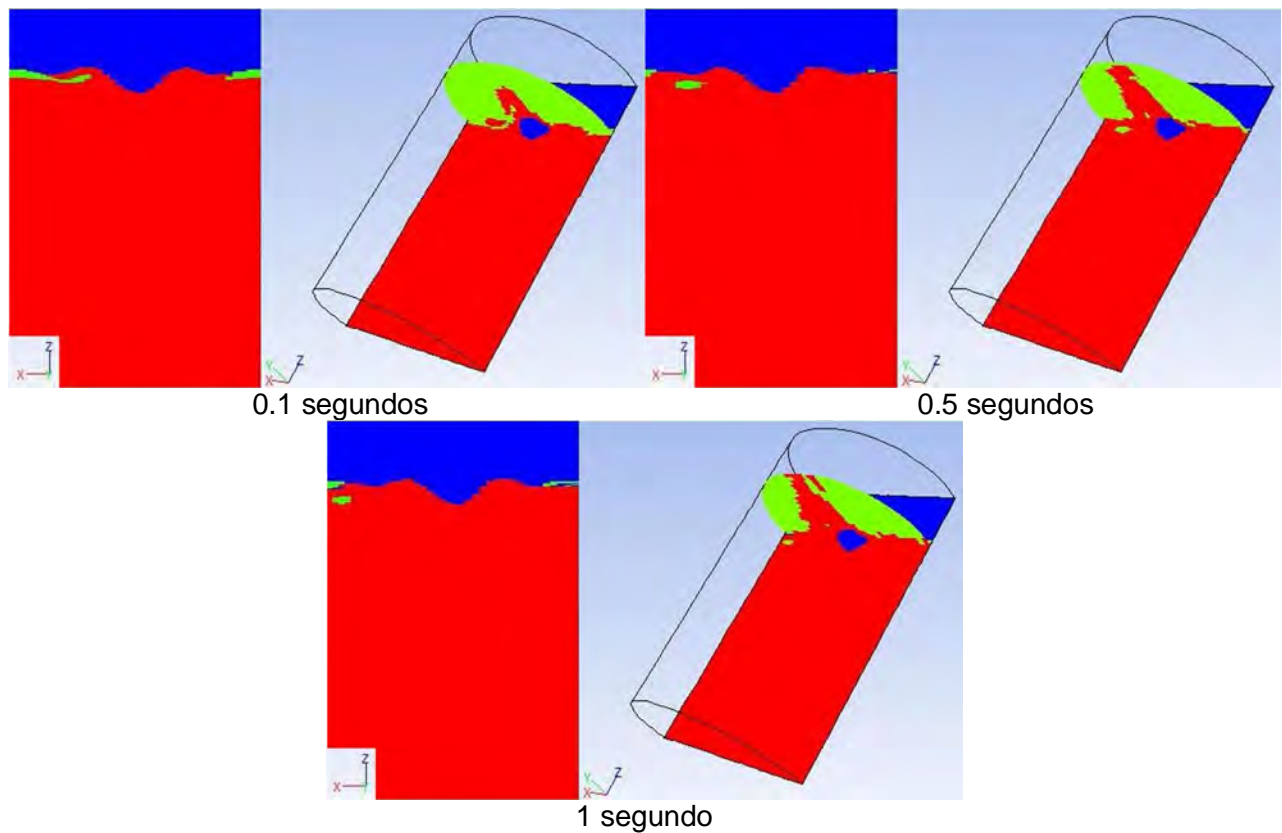
Figura 23. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.





1 segundo

Figura 24. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 60°.



0.1 segundos

0.5 segundos

1 segundo

Figura 25. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 75°.

De la **Figura 21** a la **23** podemos observar el efecto que tiene el flujo de gas en la ubicación de las fases dentro del sistema. Conforme el flujo de gas aumenta, la capa de keroseno se abre más hacia las paredes del cilindro y penetra más el jet gaseoso (zona azul) o dicho de otro modo es más grande la depresión formada. Otro aspecto importante que se observa es que mientras más grande es el flujo de gas, el sistema se vuelve más inestable y comienza a observarse presencia de keroseno dentro del agua, lo que se podría considerarse como el inicio de la emulsificación. De la **Figura 23** a la **25** se muestra el efecto que tiene el ángulo de incidencia, donde se observa que a medida que el ángulo sea más vertical, crece el tamaño de la depresión o de la penetración del jet y la capa de keroseno se desplaza más rápido hacia las paredes del recipiente y por lo tanto el sistema es más inestable provocando emulsificación.

3.1.3 Geometría de la cavidad

Las cavidades predichas por el modelo matemático se muestran en las **Figuras 26** y **27**. En el caso de la **Figura 26** se presenta el efecto de la variación del flujo de gas (60 l/min **(a)**, 80 l/min **(b)** y 100 l/min **(c)**) manteniendo un ángulo de lanza de 60°. Se puede observar perfectamente que a medida que el flujo de gas incrementa tanto la profundidad como el diámetro de la cavidad aumentan, así como la inestabilidad superficial cercana a la zona de incidencia del jet.



(a)

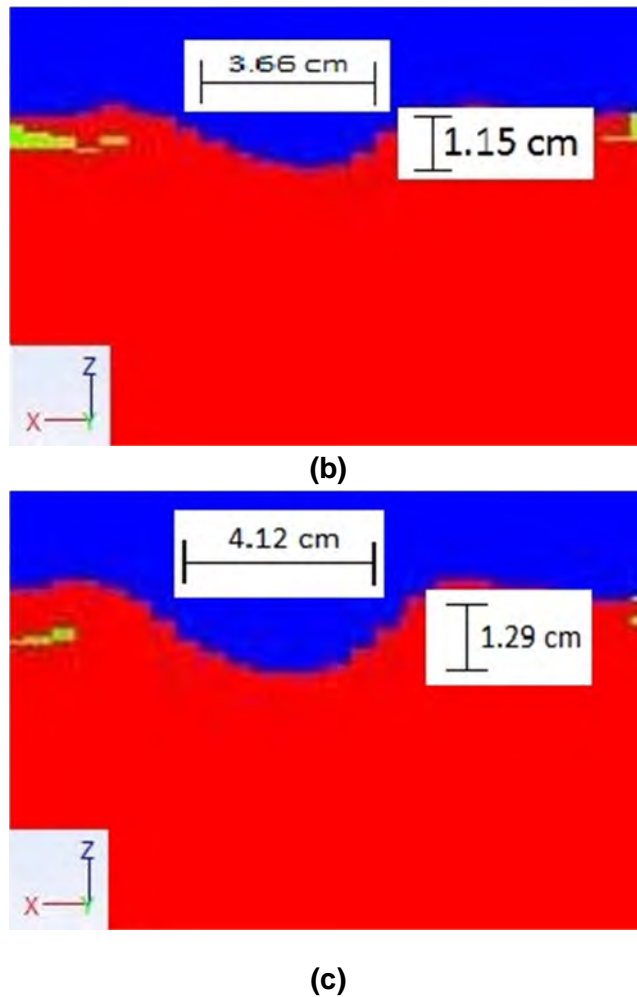
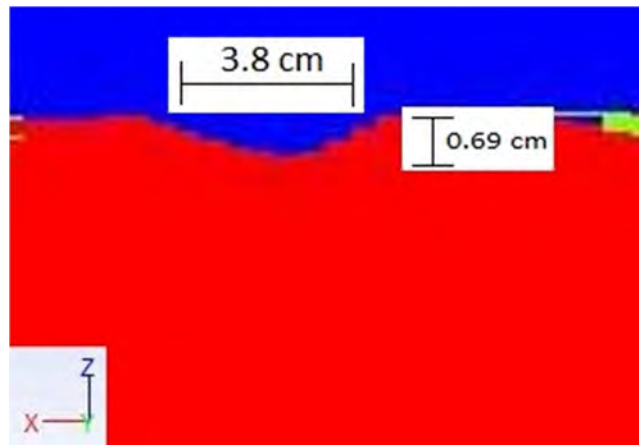
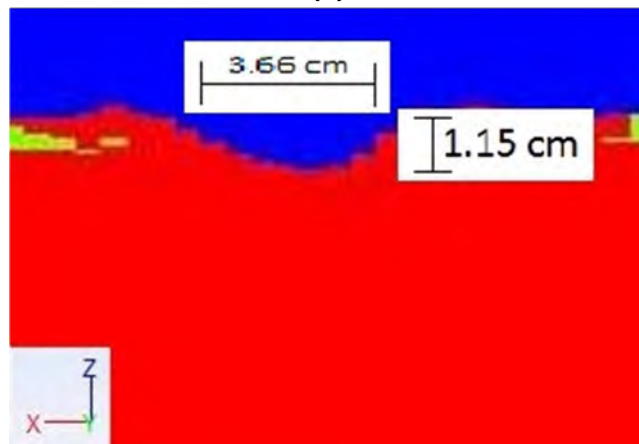


Figura 26. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad variando el flujo de gas((a) 60 l/min, (b) 80 l/min y (c) 100l/min) y un ángulo de lanza constante de 60°.

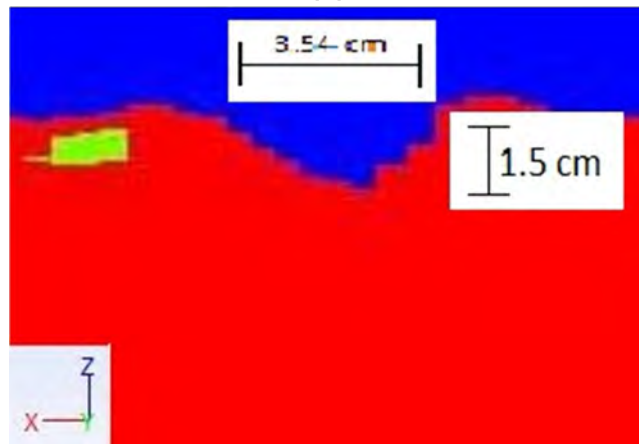
La **Figura 27** muestra el efecto del ángulo de lanza con respecto a la horizontal ((a)50°, (b) 60° y (c) 75°) manteniendo un flujo de gas de 80 l/min. En esta figura se observa claramente que al disminuir el ángulo, es decir, lanzas más horizontales, la contribución que tiene el esfuerzo cortante es mayor y por lo tanto la presión del jet incidente disminuye promoviendo que la profundidad de la cavidad formada sea menor, sin embargo, ya que el momentum transferido del jet al baño en forma de corte viscoso es mayor se promueve la formación de una cavidad más ancha.



(a)



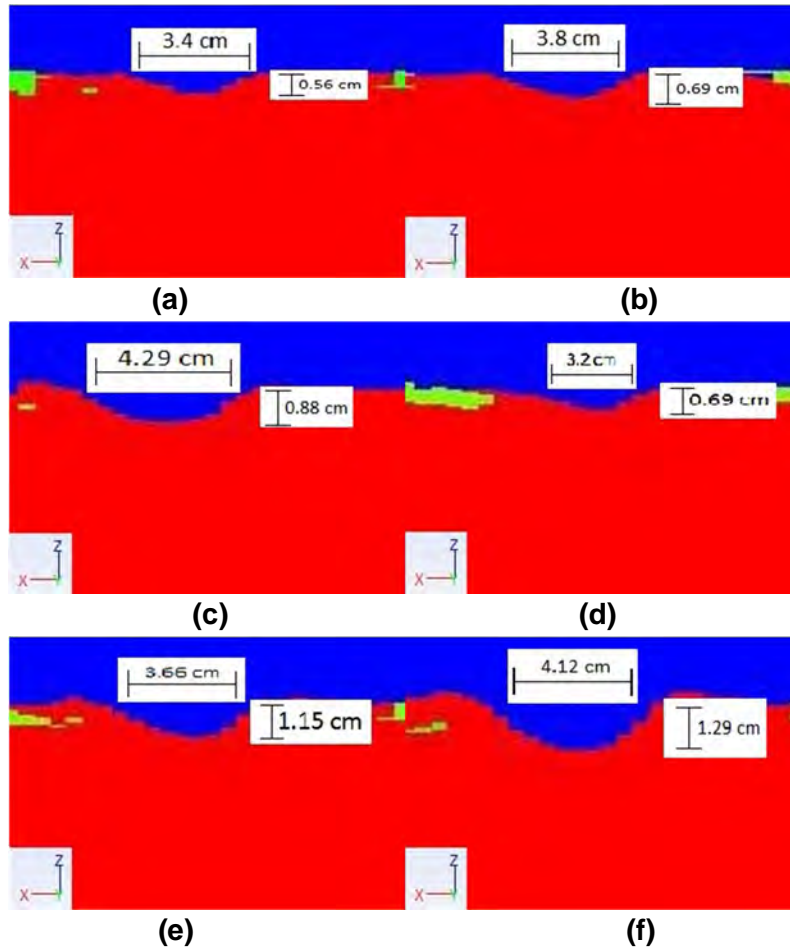
(b)



(c)

Figura 27. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad variando el ángulo de lanza((a) 50°, (b) 60° y (c) 75°) y un flujo de gas constante de 80 l/min.

La **Figura 28** presenta los resultados para la geometría de las cavidades de los nueve cálculos ((**a**) 60 l/min; 50°, (**b**) 80 l/min; 50°, (**c**) 100 l/min; 50°, (**d**) 60 l/min; 60°, (**e**) 80 l/min; 60°, (**f**) 100 l/min; 60°, (**g**) 60 l/min; 75°, (**h**)80 l/min; 75°, (**j**) 100 l/min;75°) donde se observa que la tendencia es la misma que existe en las **Figuras 26 y 27** para los diferentes flujos de gas y ángulos de lanza respectivamente. Con un flujo de gas bajo de 60 l/min (incisos a, d, g) se aprecia la capa de keroseno desplazada de la cavidad, mientras que a flujos altos (100 l/min) esta capa no se aprecia en este plano, señal de que se ha desplazado aún más lejos al keroseno o se ha emulsificado con agua (incisos, c, f, j).



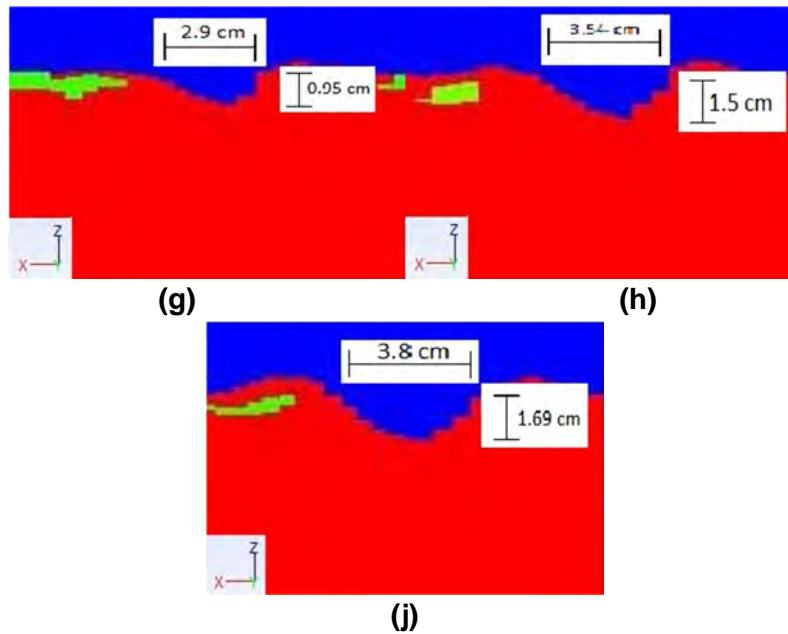


Figura 28. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad ((a) 60 l/min; 50°, (b) 80 l/min; 50°, (c) 100 l/min; 50°, (d) 60 l/min; 60°, (e) 80 l/min; 60°, (f) 100 l/min; 60°, (g) 60 l/min; 75°, (h) 80 l/min; 75°, (j) 100 l/min; 75°).

Como ya se mencionó anteriormente la validación del modelo matemático desarrollado en este trabajo se realiza mediante la comparación de las predicciones de la profundidad de la cavidad contra una correlación empírica adimensional reportada por Wakelin [12] que ha demostrado tener validez.

Para este modelo en particular en el cual se ven involucradas dos fases líquidas inmiscibles entre sí (keroseno-agua), la correlación empírica tiene como una de sus variables la densidad del líquido, por lo que se obtuvieron tres resultados diferentes empleando la densidad del agua, del keroseno, o del promedio entre keroseno y agua. La Tabla 3 muestra estas distintas densidades usadas en la correlación.

$\rho_{\text{agua}}(\text{kg/m}^3)$	1000
$\rho_{\text{keroseno}}(\text{kg/m}^3)$	780
$\rho_{\text{promedio}}(\text{kg/m}^3)$	890

Tabla 3. Densidades los líquidos dentro del baño y densidad promedio.

Los resultados obtenidos al aplicar la correlación de Wakelin para todas las condiciones de operación calculadas en esta tesis se muestran en la Tabla 4.

No. Cálculo	Profundidad de la cavidad de FLUENT (m)	Momentum del Jet J_z (Kgm/s ²)	$(h/z)*(h+z)/z^2$	$Jz/(g*\rho*z^3)$ ρ_{agua}	$Jz/(g*\rho*z^3)$ $\rho_{keroseno}$	$Jz/(g*\rho*z^3)$ $\rho_{promedio}$
1	0.0056	0.0045	0.0792	0.0016	0.0021	0.0018
2	0.0069	0.0081	0.1016	0.0029	0.0037	0.0032
3	0.0088	0.0115	0.1373	0.0041	0.0052	0.0046
4	0.0069	0.0059	0.1497	0.0031	0.0040	0.0035
5	0.0115	0.0105	0.2864	0.0055	0.0071	0.0062
6	0.0129	0.0165	0.3344	0.0087	0.0112	0.0098
7	0.0095	0.0073	0.2570	0.0054	0.0069	0.0061
8	0.015	0.0131	0.4820	0.0096	0.0123	0.0108
9	0.0169	0.0166	0.5744	0.0122	0.0156	0.0137

Tabla 4. Resultados obtenidos al aplicar la correlación de Wakelin.

En la **Figura 29** se grafica la depresión adimensional de la cavidad $(h/z)*(h+z/z)^2$ contra el número adimensional $J_z/(g*\rho*z^3)$, que involucra el momentum del jet (J_z) así como a la fuerza boyante.

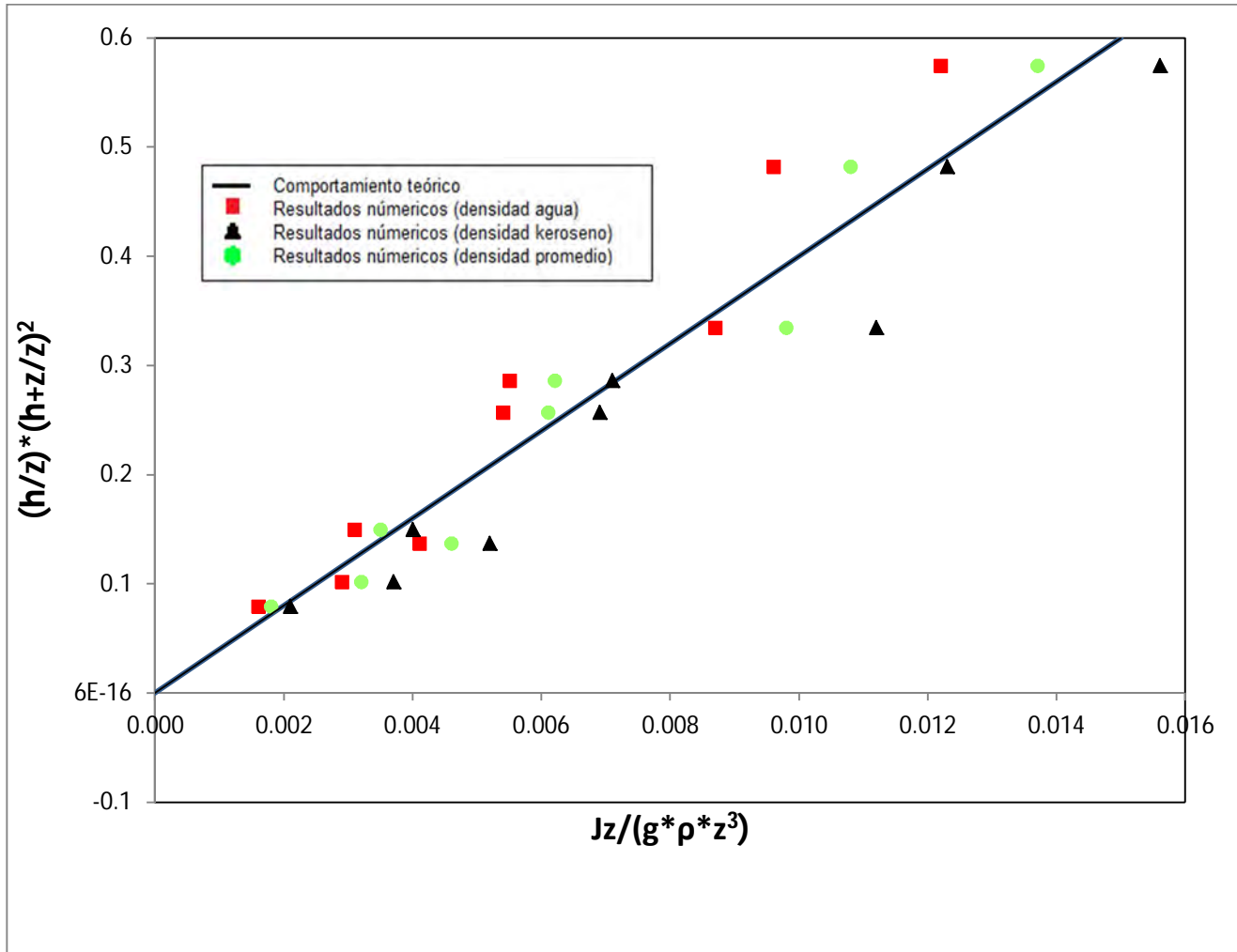


Figura 29. Comparación entre resultados numéricos obtenidos usando la correlación propuesta por Wakelin contra el comportamiento teórico de dicha correlación.

La **Figura 29** muestra que los resultados obtenidos en el modelo matemático usando la correlación de Wakelin tienen una concordancia bastante apegada al comportamiento teórico de dicha correlación (línea continua). También se puede observar que cuando el valor del número adimensional $J_z/(g*\rho*z^3)$ está por debajo de 0.008 los cálculos del modelo matemático se apegan mucho mejor al comportamiento teórico que cuando está por encima de este valor, esto se puede explicar tomando en cuenta que el número adimensional $J_z/(g*\rho*z^3)$ tiene

como variable el momentum del jet gaseoso, por lo tanto entre menor sea el momentum del jet gaseoso menor será la turbulencia y la inestabilidad del sistema. De esta forma se puede afirmar que el modelo desarrollado en este trabajo describe adecuadamente la geometría de las cavidades formadas por la incidencia de un jet gaseoso en un baño bifásico.

Por otra parte, en la **Figura 29** también se observa el efecto de la densidad. Al tener un sistema de dos líquidos (agua-keroseno) inmiscibles, no es claro la densidad a usar en esta correlación, ya que el keroseno es el líquido que recibe el chorro, pero una vez que penetra éste desplaza al keroseno y la depresión se forma en agua. Por lo anterior, se calcularon los resultados con la densidad del agua, con la de keroseno y con el promedio de ambas densidades, teniendo como resultado que al calcular los valores con la densidad promedio se obtienen resultados más apegados a la correlación de Wakelin, lo que resulta razonable si se toma en cuenta que la capa de keroseno en el baño líquido es muy delgada y al tiempo en el que el chorro de gas incide sobre el baño líquido se pone en contacto casi instantáneamente con ambas fases (agua-keroseno). Sin embargo, también podemos observar que el resultado que más se aleja del comportamiento teórico es el que involucra el cálculo con la densidad del keroseno, esto se debe a que la capa de keroseno es muy delgada y al contacto con el chorro de gas se abre casi instantáneamente y se recorre a las orillas del cilindro, quedando casi en su totalidad una fase presente (agua) en las cercanías de la cavidad, debido a esto los resultados utilizando la densidad del agua tienen una mejor concordancia.

En la **Figura 30** se muestran imágenes de las cavidades típicas predichas en un baño bifásico manteniendo un ángulo fijo de 60° con una distancia entre la tobera y la superficie libre de 50 mm y variando el flujo de gas en 60 (a), 80 (b) y 100 l/min (c), mientras que en la **Figura 31** se mantiene el flujo en 80 l/min con una distancia entre la tobera y la superficie libre de 50 mm y se varía el ángulo de lanza de 60° y 75° . Cada imagen de ambas figuras se compara contra las cavidades típicas predichas en un baño monofásico con las mismas condiciones de operación, estas últimas se toman del trabajo que realizó J. Solórzano López

en su tesis de doctorado [7], con lo cual se puede comparar el efecto que tiene el agregar una capa de keroseno sobre un baño de agua simulando así la presencia de escoria en un baño metálico.

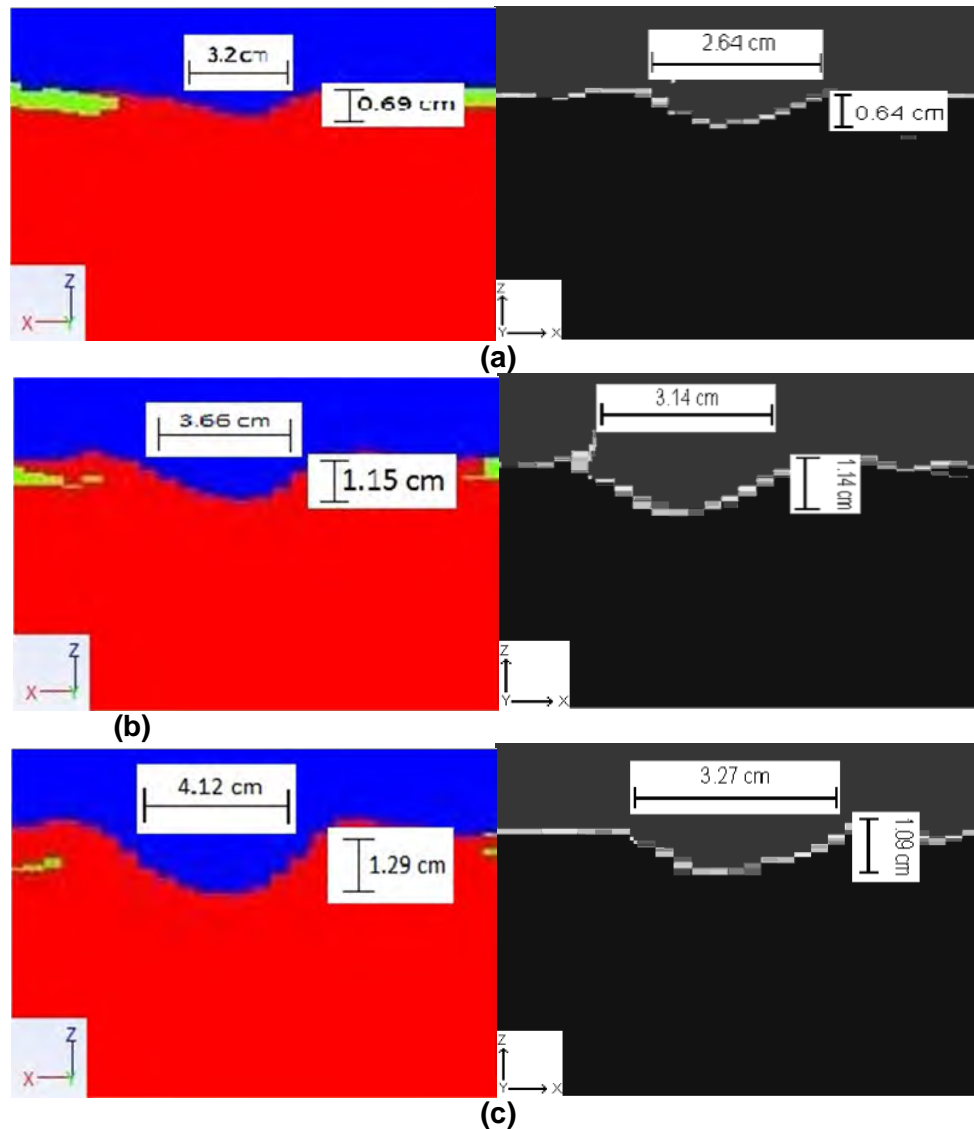


Figura 30. Cavidades típicas predichas en un baño bifásico (Izquierda) contra cavidades típicas predichas en un baño monofásico (Derecha), teniendo como variable el flujo de gas (60 l/min **(a)**, 80 l/min **(b)** y 100 l/min **(c)**) con un ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

La **Figura 30** muestra claramente lo encontrado con anterioridad en la **Figura 26**, que a medida que aumenta el flujo de gas en el sistema tanto la profundidad de la cavidad como el diámetro de la misma aumentan y esto aplica

para ambos casos, tanto en el baño bifásico como en el baño monofásico. La diferencia que existe entre ambos sistemas radica en el diámetro de la cavidad, en el caso de un baño monofásico los diámetros de las cavidades son menores que para el caso de un baño bifásico, mientras que la profundidad se mantiene prácticamente igual en ambos casos aunque el sistema bifásico presenta mayores profundidades.

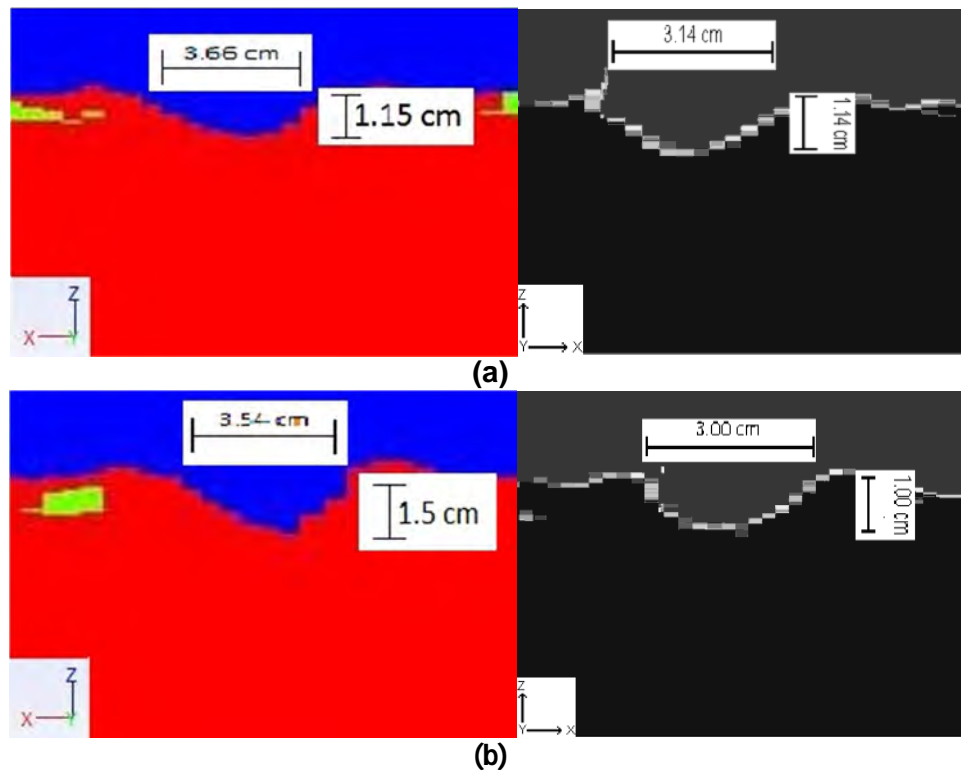


Figura 31. Cavidades típicas predichas en un baño bifásico (Izquierda) contra cavidades típicas predichas en un baño monofásico (Derecha), teniendo como variable el ángulo de lanza: **(a)** 60° y **(b)** 75°, con un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

La **Figura 31** muestra que a medida que el ángulo de lanza es menor, es decir, más cerca de la horizontal, la profundidad de la cavidad formada es menor y el diámetro de la misma es mayor. Del mismo modo, la diferencia que existe entre la predicción de la cavidad en un sistema monofásico y uno bifásico es el diámetro de la cavidad, es decir, en el caso de un baño monofásico los diámetros de las cavidades son menores que para el caso de un baño bifásico, mientras que las profundidades también muestran una variación al ser más profundas para un sistema bifásico, aunque esta sea en menor escala que los diámetros. Este

fenómeno se puede explicar a partir del balance de fuerzas que gobierna la formación de la cavidad que se menciona en el capítulo 2 (Fuerza de gravedad + Fuerza de tensión superficial = Fuerza de inercia del jet). La comparación entre sistemas aire-agua y aire-keroseno-agua implica que la fuerza inercial del jet en todos los casos comparados sean iguales para ambos sistemas, por lo tanto las fuerzas dominantes en la variación del diámetro de la cavidad son las fuerzas de tensión superficial y en menor medida las gravitacionales ya que la capa de keroseno es muy delgada y menos denso por lo que el sistema bifásico con keroseno presenta cavidades más grandes. Creemos que en las fuerzas de tensión superficial no son tan importantes en estos sistemas, pues los radios de curvatura (profundidades y anchos) de las cavidades son grandes y entonces el efecto de la tensión superficial se diluye en comparación a las otras dos fuerzas. No obstante, ambas tensiones superficiales (del agua y del keroseno) se incluyeron en el modelo.

Para visualizar de mejor manera las observaciones mencionadas en las **Figuras 30 y 31**, se presenta a continuación en las **Figuras 32, 33, 34 y 35** gráficas que muestran tanto la profundidad como los diámetros formados en las depresiones en función del flujo de aire y el ángulo de lanza para los sistemas monofásico y bifásico respectivamente, y donde podemos observar de manera más clara la diferencia que existe entre ambos sistemas.

La **Figura 32** muestra la profundidad de las cavidades formadas en función del flujo de aire para un sistema monofásico y uno bifásico con las mismas condiciones de operación. El único problema que se presenta en estos resultados es que solo se tiene tres puntos en la gráfica, es decir, solo se pudieron comparar tres experimentos en las mismas condiciones de operación y esto limita un poco el análisis que se pueda hacer al respecto. Sin embargo, se muestra claramente que las profundidades de las depresiones formadas son mayores en los tres casos para un sistema bifásico, y también se puede argumentar que a flujos mayores de aire la diferencia de profundidades se hace mayor que en el caso de flujos de aire

pequeños, aunque también se debe tener en cuenta que en el caso del sistema monofásico se observa que en el caso del flujo más alto (100 l/min) la profundidad es menor que para el flujo de aire intermedio (80 l/min) por lo que podría existir un error en el cálculo presentado y por esta razón se aleje del comportamiento esperado. Otra posible explicación es que exista mucha salpicadura de gotas a flujo alto de gas, por lo que parte de la inercia del jet de gas se pierde en ese salpicado y por eso disminuye el tamaño de la depresión.

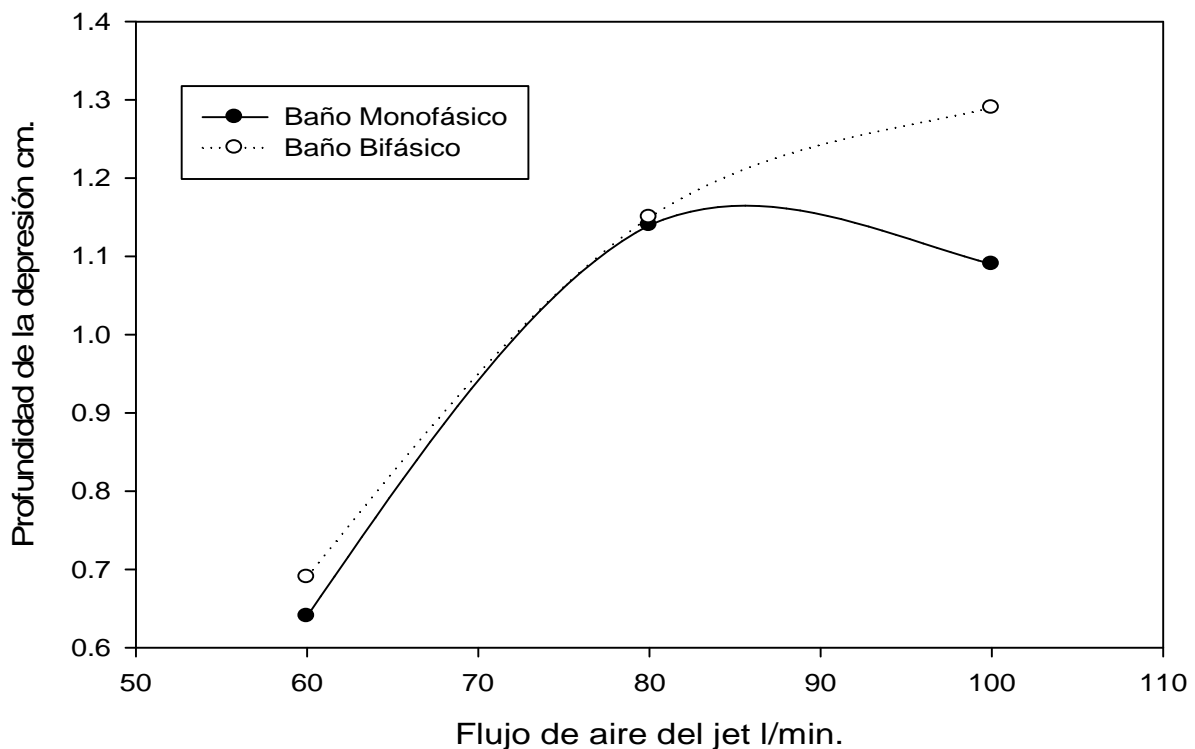


Figura 32. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico de la profundidad de la depresión en función del flujo de aire y con un ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

La **Figura 33** muestra la comparación del diámetro de cavidad formados en función del flujo de aire en un sistema monofásico y en uno bifásico. Se corrobora que se tienen diámetros mayores en un sistema bifásico. Sin embargo, en esta figura se muestra de mejor forma que el diámetro de la cavidad se ve afectado en mayor proporción que la profundidad de la misma, ya que si lo comparamos con la **Figura 32** donde los puntos entre el baño monofásico y bifásico están muy cerca

uno del otro para las mismas condiciones de operación en este caso se alejan mucho uno del otro con lo que podemos corroborar que el diámetro se ve afectado en mayor escala que la profundidad de la depresión cuando se tienen dos líquidos.

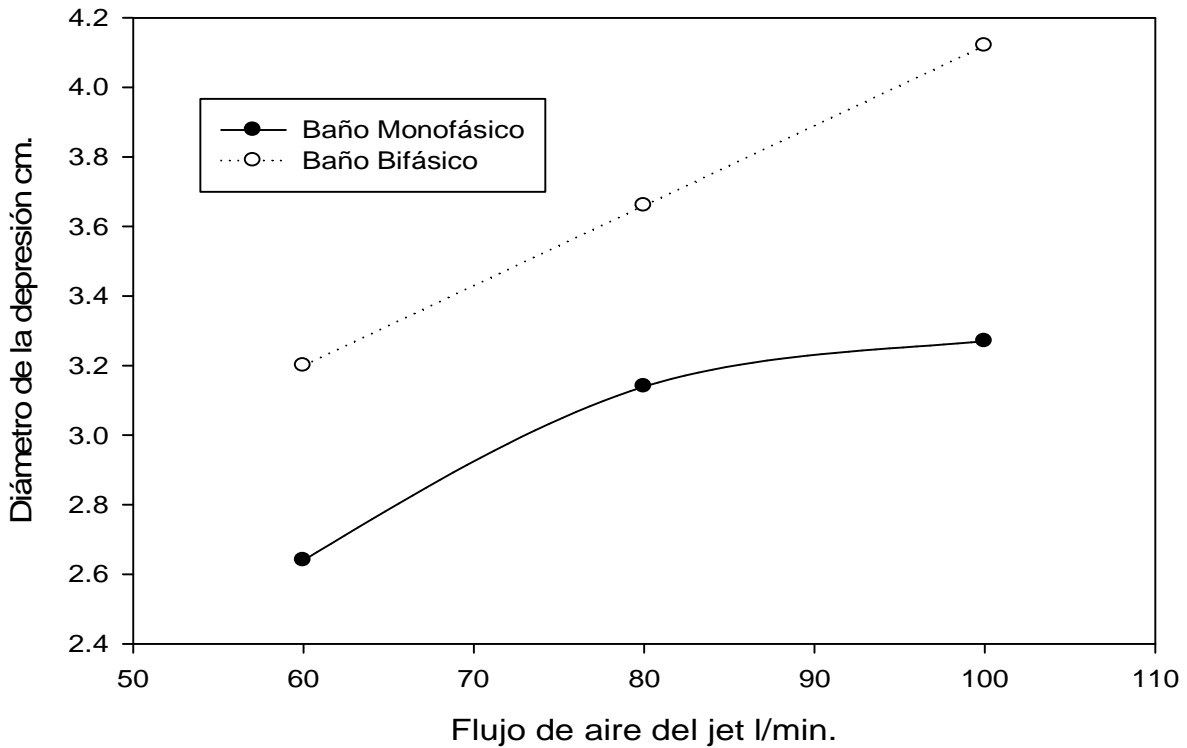


Figura 33. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico del diámetro de la depresión en función del flujo de aire y con un ángulo de lanza de 60° , una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Sí en el caso de las **Figuras 32 y 33** se tuvo problemas debido a que solo se pudieron comparar tres experimentos bajo las mismas condiciones de operación, en el caso de las **Figuras 34 y 35** esta situación empeora al solo tener datos de dos experimentos bajo las mismas condiciones de operación, no obstante pueden observarse la diferencia existente entre los sistemas monofásico y bifásico respectivamente.

La **Figura 34** nos muestra las profundidades de las cavidades formadas tanto en un baño monofásico como en un baño bifásico en función del ángulo de lanza y se observa que en el caso donde el ángulo de lanza es de 60° las

profundidades en ambos sistemas son prácticamente iguales, lo que ratificaría que la profundidad se ve afectada de forma mínima con el ángulo de la lanza. Sin embargo, el caso donde el ángulo de lanza es de 75° la diferencia de profundidades es muy grande, siendo mayor para el caso de un baño bifásico.

Este resultado contradice la tendencia que se ha venido planteando, y esto se puede explicar en torno nuevamente a la aparición de salpicaduras en el baño, provocando que parte de la energía inercial del sistema se pierda y consecuentemente la profundidad del baño disminuya, esto para el caso del baño monofásico. En el caso del baño bifásico se aprecia que la profundidad aumenta. En la **Figura 27** se analiza la variación del ángulo de incidencia del jet gaseoso, por lo que se piensa que en un baño bifásico la presencia de salpicaduras en el baño es menor respecto de un baño monofásico.

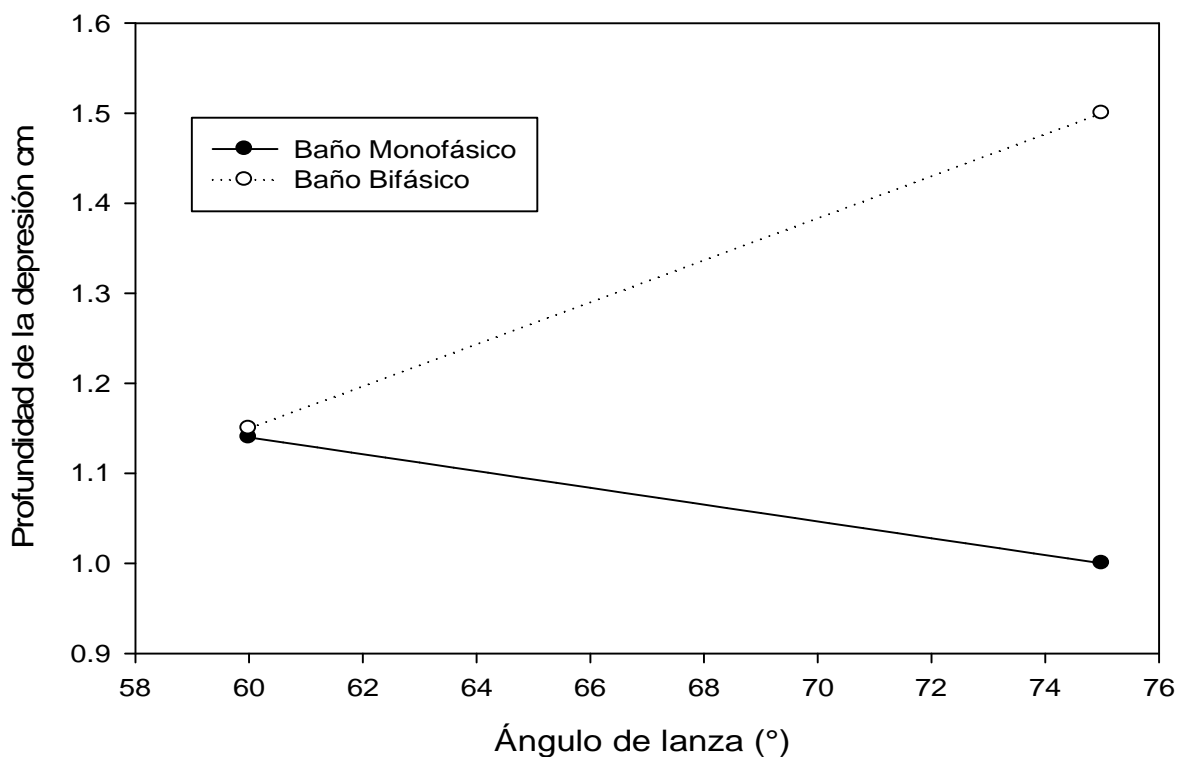


Figura 34. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico de la profundidad de la depresión en función del ángulo de lanza y con un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

La **Figura 35** muestra nuevamente la comparación entre un baño bifásico y uno monofásico de los diámetros de cavidad formados pero ahora en función del ángulo de lanza, y se puede observar nuevamente de manera clara que los diámetros de cavidad formados son mayores para el caso de un sistema con un baño bifásico y se corrobora que el diámetro se ve afectado en mayor medida que la profundidad.

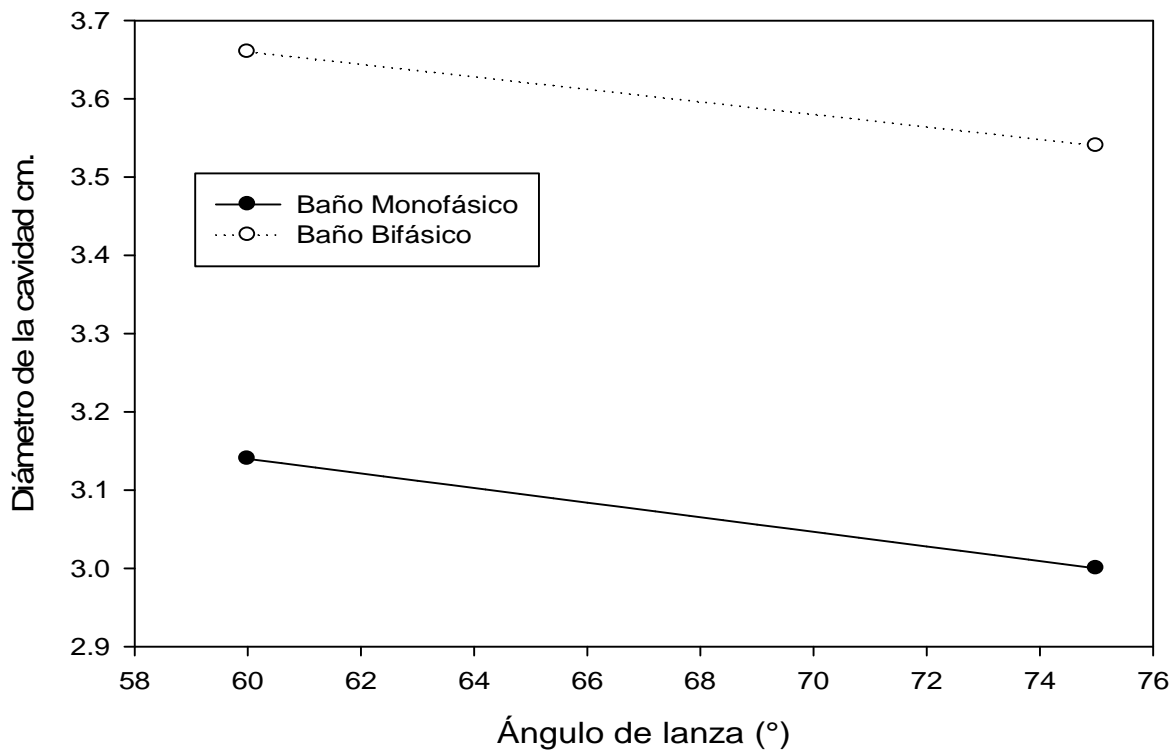
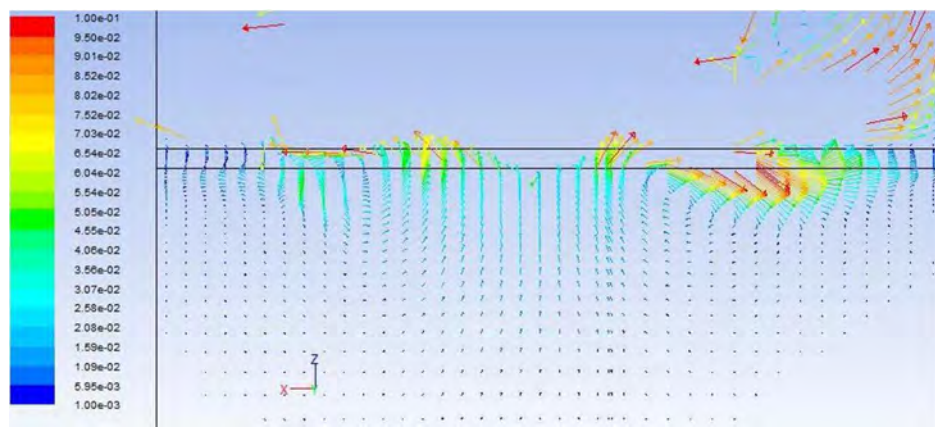


Figura 35. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico del diámetro de la depresión en función del ángulo de lanza y con un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

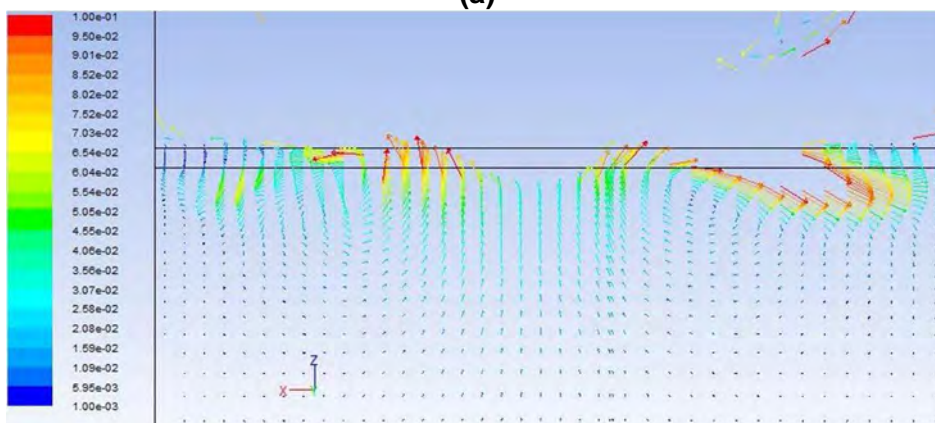
3.1.4 Perfiles de velocidad.

Los perfiles de velocidad predichos por el modelo matemático se muestran en la **Figura 36** variando el flujo de gas de 60, 80 y 100 l/min con un ángulo de 60°, mientras que en la **Figura 37**, se varía el ángulo de lanza en 50°, 60° y 75° con un

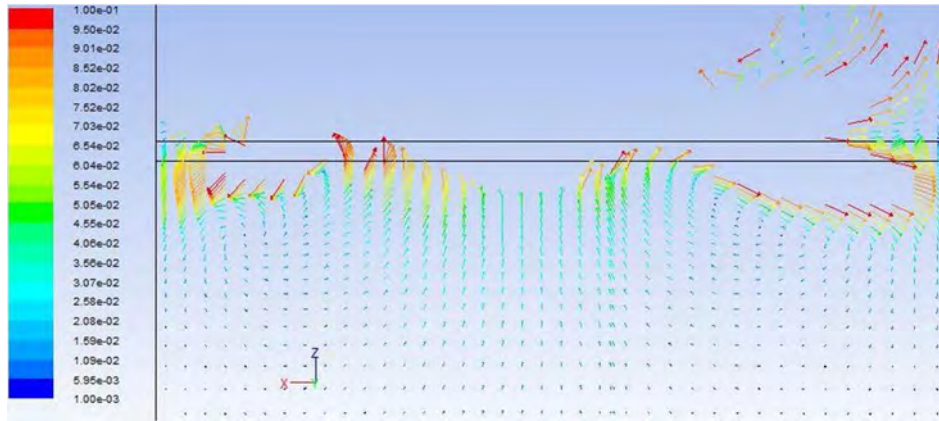
flujo de 80 l/min. Cada imagen posee una escala de velocidades acotada entre 0.1 y 0.2 m/s para evitar visualizar el jet de gas y únicamente ver el patrón de flujo formado en el baño líquido. Además, se colocaron dos líneas paralelas horizontales que representan la ubicación original de la capa de keroseno líquido suspendida sobre el baño de agua. De esta forma se puede observar de una manera más adecuada las circulaciones dentro del cilindro para su análisis. La circulación del fluido es uno de los aspectos más importantes a estudiar de las interacciones jet – baño, ya que la agitación que provoca el jet incidente en el fluido ayuda a transportar masa y energía por convección, lo cual acelera las cinéticas de los procesos metalúrgicos con jets gaseosos incidiendo en baños como en el caso de la aceración en convertidores con oxígeno o BOF.



(a)



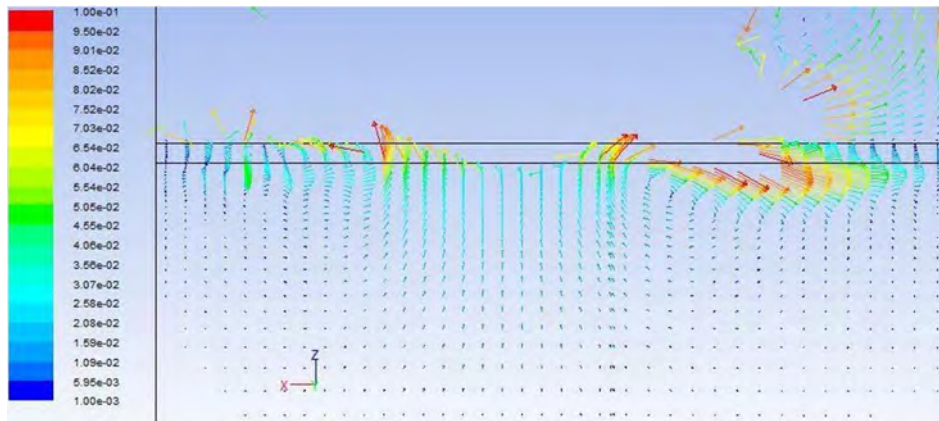
(b)



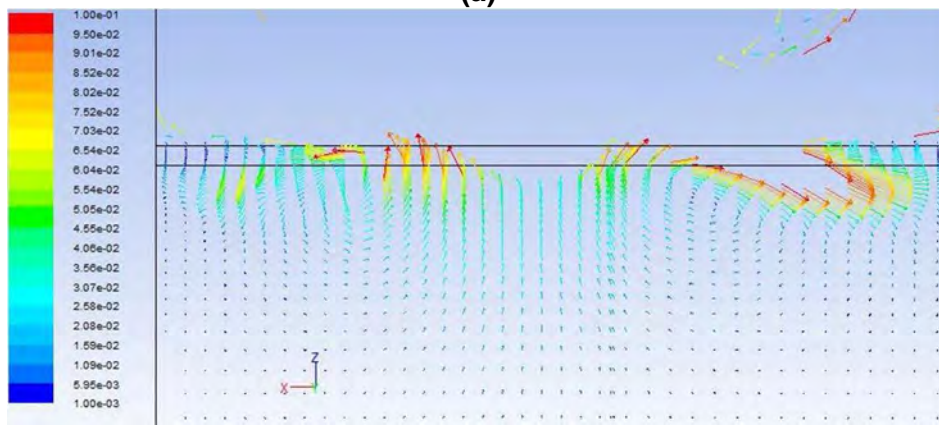
(c)

Figura 36. Perfiles de velocidad obtenidos mediante el modelo matemático variando el flujo de gas ((a) 60 l/min, (b) 80 l/min y (c) 100 l/min) y un ángulo de lanza constante de 60° .

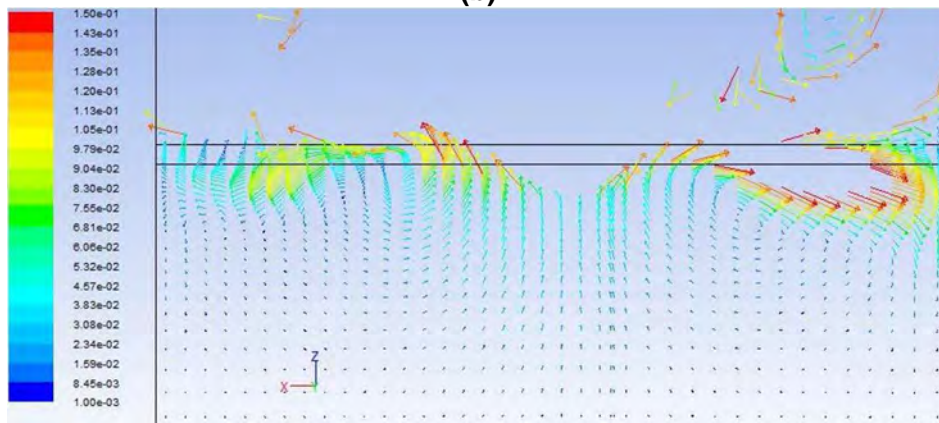
En la **Figura 36** se observa el efecto que tiene el flujo de gas sobre los perfiles de velocidad dentro del baño líquido manteniendo el ángulo de lanza constante de 60° , y se aprecia como a medida que el flujo de gas aumenta las velocidades en el líquido aumentan. Sin embargo, cerca de la incidencia del jet, es decir, alrededor de la cavidad formada, los patrones de flujo tienen variaciones. Con el flujo más bajo (**a**) de 60 l/min la velocidad del líquido es alrededor de 0.06 m/s, mientras que para el flujo más alto (**c**) de 100 l/min la velocidad es alrededor de 0.08 m/s. Por otro lado, lejos de la zona de incidencia del jet se puede observar que las variaciones en las velocidades del líquido son mucho mayores de un flujo a otro. Tal es el caso de la zona cercana a la pared del cilindro, donde para el flujo más bajo (**a**) de 60 l/min la velocidad del líquido es alrededor de 0.001 m/s, mientras que para el flujo más alto (**c**) de 100 l/min la velocidad es alrededor de 0.07 m/s. Se puede apreciar que con flujo de gas bajo, el líquido prácticamente no se mueve, mientras que para el caso con flujo alto, la circulación de fluido es mayor.



(a)



(b)



(c)

Figura 37. Perfiles de velocidad obtenidos mediante el modelo matemático variando el ángulo de lanza ((a) 50°, (b) 60° y (c) 75°) y un flujo de gas constante de 80 l/min.

En el caso de la **Figura 37** se observa el efecto del ángulo de lanza sobre los perfiles de velocidad dentro del baño líquido manteniendo un flujo de gas constante de 80 l/min. Se puede apreciar que a medida que el ángulo de

incidencia crece, es decir la pendiente sea mayor, las velocidades superficiales aumentan, sin embargo las velocidades dentro del baño disminuyen ya que a ángulos más verticales el esfuerzo de corte es menor y en consecuencia se transmite un menor movimiento hacia el baño provocando poca circulación de fluido.

La **Figura 38** muestra una imagen de perfiles de velocidad predichos en un baño bifásico (izquierda), y esta se compara contra los perfiles de velocidad predichos en un baño monofásico (derecha) con las mismas condiciones de operación (80 l/min y 60° con 50 mm de separación de la lanza a la superficie libre). De nuevo, los patrones de flujo del baño monofásico se toman del trabajo de J. Solórzano López en su tesis doctoral [7]. Se puede observar que la zona donde se concentra el movimiento del fluido en el baño monofásico (derecha), está prácticamente alrededor de la zona de incidencia del jet, por lo que la comparación solo se puede dar en esta zona. En el caso de las velocidades cercanas a la zona de incidencia del jet en el baño bifásico se reportan velocidades alrededor de 0.07 m/s, mientras que para el baño monofásico el autor reporta en su trabajo velocidades alrededor de 0.1 m/s, lo que indica que la presencia de una segunda fase inmiscible líquida dentro del baño retarda o desacelera la fluidinámica del proceso. En este caso en particular el keroseno tiene una viscosidad de $2.4 \times 10^{-3} \text{ Kg/ms}$ y el agua de $1.003 \times 10^{-3} \text{ Kg/ms}$. Esto quiere decir que el keroseno es más viscoso que el agua, por lo tanto, los esfuerzos cortantes que existen entre ambos líquidos al desplazarse son mayores provocando así una disminución de velocidades en el baño líquido, además de que en el caso del baño bifásico se forman recirculaciones tanto para el agua como para el keroseno, las cuales giran en sentido contrario una de la otra provocando de igual manera un aumento en los esfuerzos cortantes dentro del sistema y disminuyendo las velocidades dentro del baño. En el caso similar de acero y escoria, la escoria retardaría el movimiento del acero disminuyendo su circulación y retardando la fluidinámica y los transportes de masa y energía, evitando el mezclado químico y térmico y promoviendo la presencia de gradientes indeseables de especies químicas y de temperaturas.

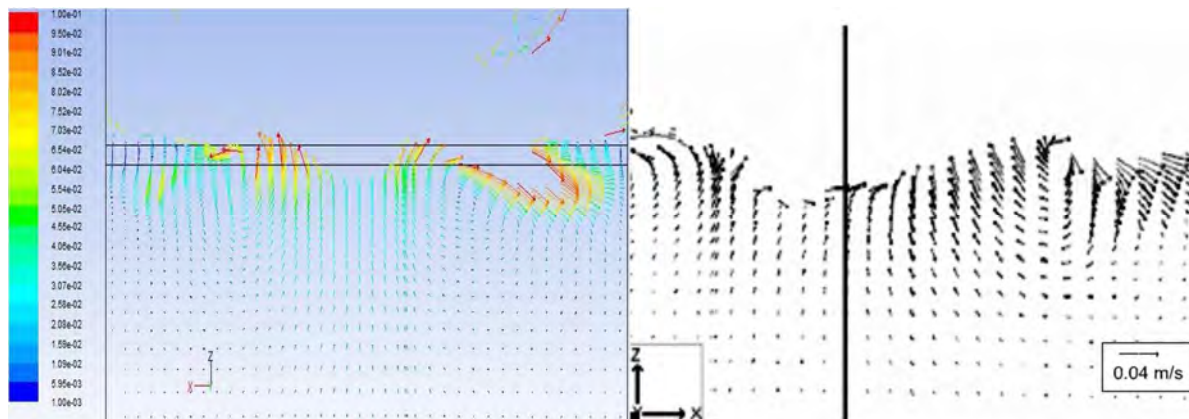
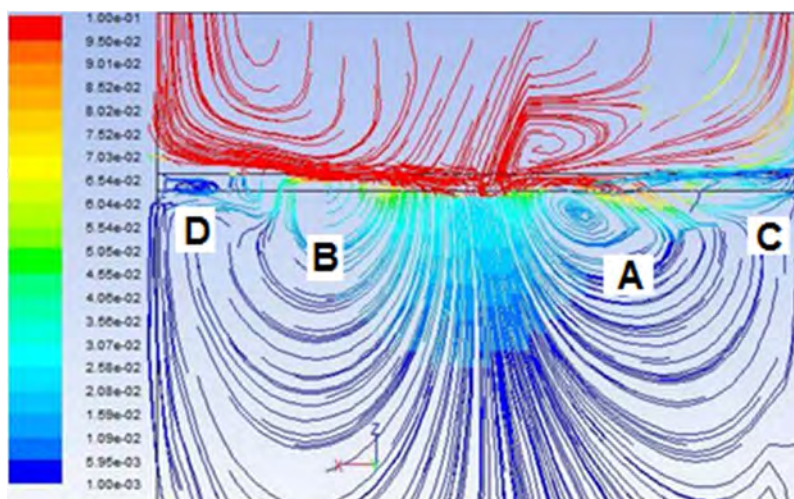


Figura 38. Perfil de velocidad predicho en un baño bifásico (izquierda) contra perfil de velocidad predicho en un baño monofásico (derecha) con las siguientes condiciones de operación: flujo de gas de 80 l/min, ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

3.1.5 Patrones de recirculación.

Las **Figuras 39 y 40** muestran tanto los patrones de recirculación como las velocidades predichas por el modelo matemático, estas imágenes tienen como objetivo observar las zonas de formación de recirculaciones dentro del sistema y observar de qué forma se mueven los líquidos dentro del cilindro. De igual manera que en las imágenes anteriores cada imagen posee una escala de velocidades acotada entre 0.1 y 0.2 m/s para visualizar únicamente el baño líquido, además de presentar las dos líneas paralelas horizontales que representan la ubicación inicial de la capa de keroseno líquido suspendida sobre el baño de agua.



(a)

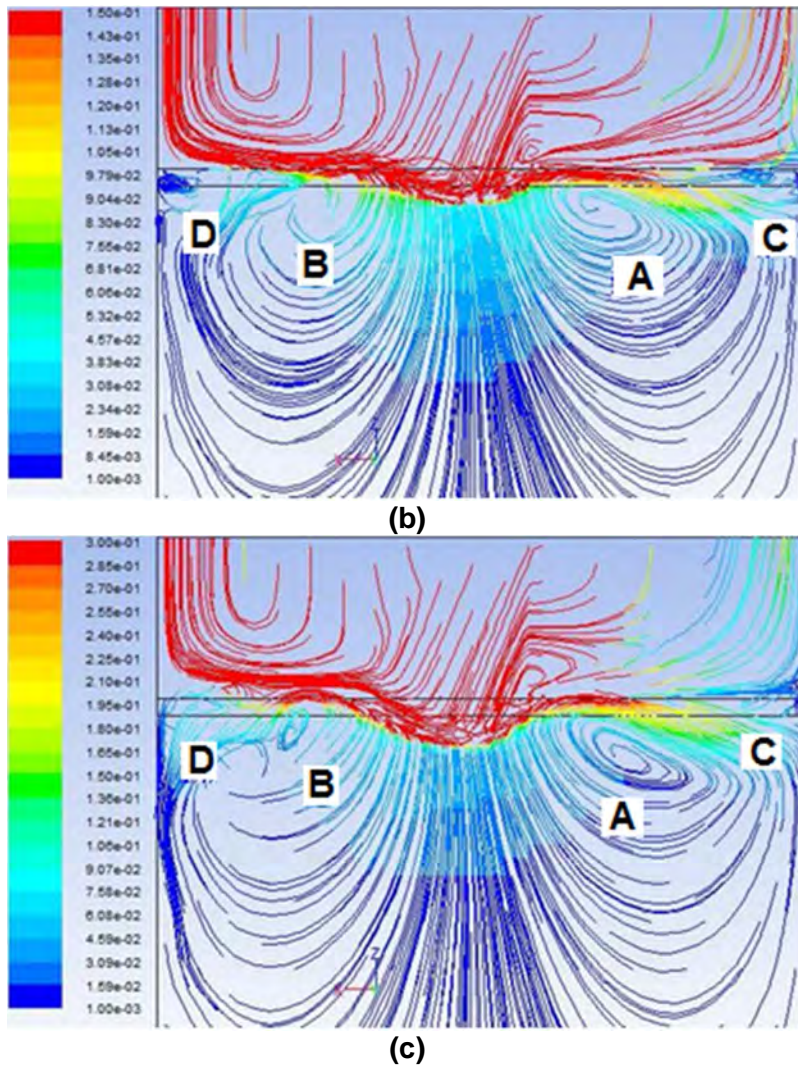
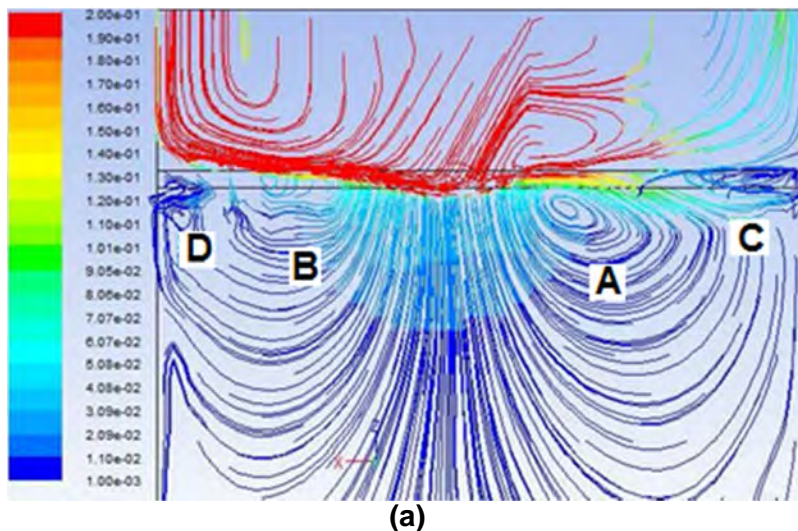


Figura 39.Patrones de recirculación obtenidos mediante el modelo matemático variando el flujo de gas ((a) 60 l/min, (b) 80 l/min y (c) 100l/min) y un ángulo de lanza constante de 60°.

En la **Figura 39** que representa el efecto del flujo de gas (60, 80 y 100 l/min con ángulo de lanza constante en 60°) en los patrones de recirculación. Se pueden observar cuatro recirculaciones dentro del baño. La primera recirculación (A), tiene su origen muy cerca de la zona de incidencia del jet del lado derecho y gira en el sentido de las manecillas del reloj, esta recirculación solo contribuye con el movimiento de agua prácticamente. La segunda recirculación (B), se localiza también muy cerca de la zona de incidencia del jet, al igual que la primer recirculación contribuye casi prácticamente al movimiento del agua además de ser

la recirculación más vigorosa o lo que es lo mismo presenta las mayores velocidades, y esto se debe principalmente al ángulo de incidencia del jet que provoca un mayor arrastre de líquido del lado izquierdo. Las dos últimas recirculaciones (C y D), contribuyen prácticamente solo al transporte del keroseno en la superficie, por lo que son recirculaciones pequeñas y con velocidades pequeñas. Estas recirculaciones se encuentran en la superficie muy cerca de las paredes del cilindro.

En cuanto al efecto que tiene el flujo de gas en este sistema se observa que a medida que incrementa el flujo de gas, las recirculaciones en el agua (A y B), crecen y se desplazan hacia abajo, esto quiere decir que existe una mayor penetración del jet en el baño y en consecuencia las velocidades en regiones más profundas del baño aumentan, mientras que para las recirculaciones en el keroseno (C y D), no se desplazan de su zona, sin embargo crecen un poco y las velocidades aumentan.



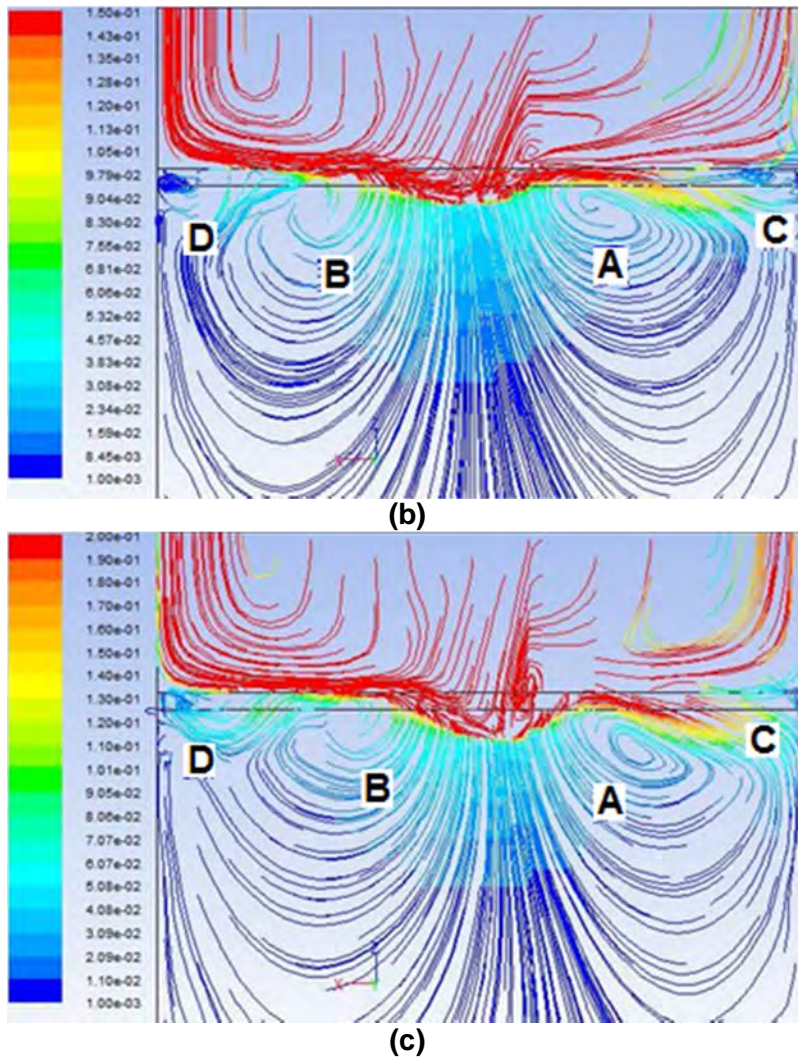


Figura 40. Patrones de recirculación obtenidos mediante el modelo matemático variando el ángulo de lanza ((a) 50°, (b) 60° y (c) 75°) y un flujo de gas constante de 80 l/min.

En la **Figura 40** se presentan los patrones de recirculación en función del ángulo de lanza (50, 60 y 75° con un flujo de aire constante de 80 l/min). Se observa claramente que al igual que los patrones de flujo en función del flujo de aire se presentan las mismas cuatro recirculaciones, donde las recirculaciones A y B se encargan principalmente de la recirculación del agua y las recirculaciones C y D se encargan del desplazamiento del keroseno. El efecto del ángulo de lanza en la recirculación del sistema se aprecia a medida que el ángulo de incidencia crece hacia la vertical, es decir se acerca a los 90°, ya que entre mayor sea el ángulo el esfuerzo cortante disminuye, por lo que las velocidades dentro del baño también

disminuyen. En el caso del baño con la incidencia de un jet gaseoso a 50° comparado con el de 60° podemos observar que la velocidades dentro de los patrones de recirculación son menores, esto se puede explicar debido a la presencia nuevamente de salpicaduras por el ángulo tan inclinado, sin embargo se observa claramente como las velocidades dentro del baño con la incidencia del jet gaseoso a 60° son mayores que las del jet a 75° .

Por último la **Figura 41** nos muestra una comparación entre los patrones de flujo desarrollados en un modelo con la incidencia de un jet gaseosos en un baño monofásico y un baño bifásico, para esto nuevamente recurrimos a la tesis doctoral de Juan Solórzano López [7].

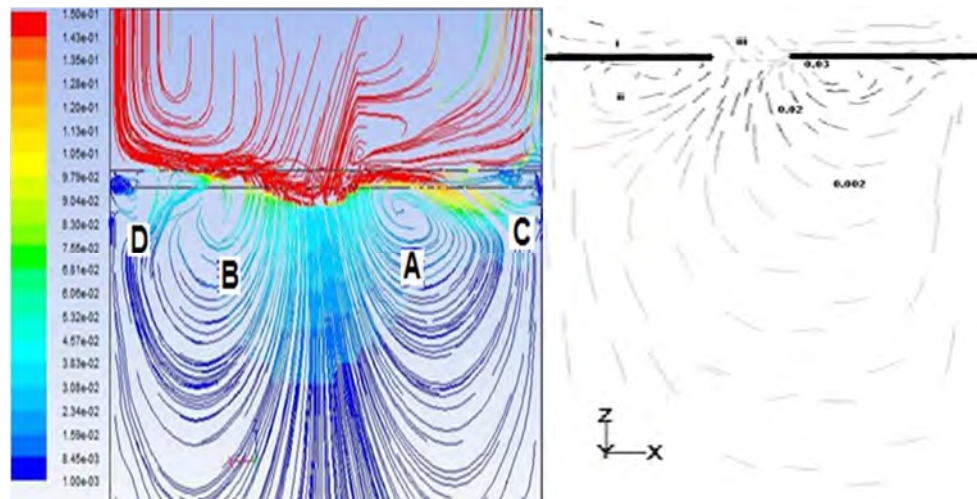


Figura 41. Patrones de recirculación en un baño bifásico (izquierda) contra el patrón de recirculación de un baño monofásico (derecha) con las siguientes condiciones de operación: flujo de gas de 80 l/min, ángulo de lanza de 60° , una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

En la **Figura 41** podemos observar claramente que para un patrón de recirculaciones de un baño monofásico solo se forman dos recirculaciones una del lado derecho y otra del lado izquierdo que giran en contra una de la otra, y estas solo se encargan de desplazar al único líquido que se encuentra dentro del

baño. Sin embargo, en el caso de un baño bifásico se tienen cuatro recirculaciones, dos de las cuales se encuentran sobre la superficie del baño muy cerca de las paredes del cilindro y que se encargan de mover al keroseno. Estas dos recirculaciones son muy pequeñas ya que la capa de keroseno es muy delgada, mientras que las otras dos recirculaciones se forman muy cerca de la zona de incidencia del jet a unos cuatro o cinco centímetros por debajo del baño y se encargan de dar movimiento al baño de agua. Estas cuatro recirculaciones en comparación con las dos del baño monofásico provocan una disminución en las velocidades dentro del baño de agua a causa de la fricción que se presenta con el keroseno viscoso. Las recirculaciones de la fase superior de keroseno inmiscible se desplazan en sentidos opuestos a las del agua lo que frena el movimiento de agua por transporte viscoso de momentum. Por lo tanto se puede decir que la presencia de más fases inmiscibles en el baño afecta al patrón flujo y a las velocidades del baño.

CONCLUSIONES

- i. El aumento en el flujo de gas provoca que la capa de keroseno se abra de forma más rápida, y desplazándola hacia las paredes del cilindro, además de que a flujos muy altos el sistema se vuelve inestable, provocando lo que pudieran ser salpicaduras y emulsificaciones. Las cavidades formadas por la incidencia de un jet gaseoso sobre el baño bifásico son mayores tanto en profundidad como en diámetro que las de un baño monofásico. Las cavidades aumentan a medida que el flujo de gas aumenta, sin embargo, al disminuir el ángulo de lanza respecto a la horizontal el diámetro aumenta debido a un mayor esfuerzo de corte y la profundidad decrece a causa de una menor penetración del jet al ejercer una menor presión normal.
- ii. La disminución en el ángulo de lanza respecto a la horizontal provoca un esfuerzo de corte mayor y por lo tanto un desplazamiento mayor de la capa de keroseno a las paredes del cilindro, además de un aumento de la circulación dentro del baño líquido.
- iii. Las profundidades calculadas con el modelo matemático desarrollado en este trabajo tienen muy buena concordancia con la correlación empírica de Wakeline, sobre todo tomando en cuenta una densidad promedio al ser un baño bifásico y a valores cercanos o menores de 0.007 del número adimensional $J_z/(g \cdot \rho \cdot z^3)$, ya que por encima de este valor, los valores calculados se alejan un poco del comportamiento ideal que predice la correlación a causa de la presencia de un jet turbulento inestable y que genera salpicaduras.
- iv. Las velocidades encontradas en los perfiles axiales de las componentes horizontales en las recirculaciones formadas en la capa de keroseno van desde 0.001 a 0.07 m/s, mientras que las velocidades en las zonas cercanas a la incidencia del jet las velocidades están en un rango de 0.06 a 0.08 m/s.
- v. Los patrones de flujo resultantes de la incidencia de un jet gaseosos sobre un baño bifásico muestran cuatro recirculaciones, de las cuales dos se encargan principalmente del movimiento del keroseno y otras dos se encargan del movimiento del agua, las primeras dos son recirculaciones

muy pequeñas que se encuentran en la capa de keroseno muy pegadas a las paredes del cilindro una en el lado derecho que gira en contra del sentido de las manecillas del reloj y otra del lado izquierdo que gira en el sentido de las manecillas del reloj, mientras que las últimas dos que se encargan del movimiento del agua tienen su origen muy cerca de la zona de incidencia del jet a unos cuatro o cinco centímetros debajo del baño líquido, de igual forma una se encuentra del lado derecho pero a diferencia de la recirculación del keroseno esta gira en el sentido de las manecillas del reloj y la recirculación del lado izquierdo es la recirculación más vigorosa de todo el sistema debido a la inclinación de la lanza que provoca un mayor arrastre por el esfuerzo de corte en esa dirección y gira en contra de las manecillas del reloj.

- vi. Mientras que para un baño monofásico solo se forman dos recirculaciones, para un baño bifásico se forman cuatro recirculaciones lo que genera una fricción por la diferencia de viscosidades de ambos líquidos provocando así una disminución en las velocidades dentro del baño, en las mismas condiciones de operación.
- vii. Los perfiles de velocidad en una zona cercana a la incidencia del jet gaseosos nos muestran que para un baño bifásico la velocidad es alrededor de 0.07 m/s, mientras que para un baño monofásico la velocidad es de 0.1 m/s, por lo tanto los perfiles de velocidad en un baño bifásico son menores que en un baño monofásico a las mismas condiciones de operación debido a la fricción generada por las dos fases líquidas dentro del baño.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Iron and Steel Institute (IISI), 2005.
- [2] <http://ocw.usal.es/eduCommons/ensenanzastecnicas/materialesii/contenidos/METALES%201.pdf> (12/08/11)
- [3] www.Steel.org (15/08/11)
- [4] F. Memoli, C. Mapelli, P. Ravanelli and M. Corbella. ISIJ Int, 44, 9, (2004) 1511-1516.
- [5] M. A. Ramirez Argaez, Proceso de fabricación de acero en Horno Electrico de Arco (Apuntes), Abril 2010.
- [6] M. A. Ramirez Argaez, Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [7] J. Solórzano López, Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autonoma de México, 2011.
- [8] A. V. Nguyen, G. M. Evans, Appl Math Model 30 (2006) 1472-1484.
- [9] M. Ersson, A. Tillander, L. Jonsson, P. Jönsson, ISIJ Int, 48, 4, (2008) 377-384.
- [10] R. Naji Meidani, M. Isac, A. Richardson, A. Cameron and R. I. L. Guthrie, ISIJ Int, Vol. 44 (2004).
- [11] J. Solórzano-López, R. Zenit, M. A. Ramírez-Argáez, Rev Metal Madrid, 45, 5, (2010), 421-434.
- [12] D. H. Wakeline, Tesis Doctoral, University of London, 1966.
- [13] J. Szekely, Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de Metales, 1ª Edición, Limusa, México, 1988.
- [14] F. Qian, R. Muthasaran, B. Farouk, Metall Mat Trans B, 27B, 6, (1996) 911-920.
- [15] Fluent Documentation, Chapter 10 “Modeling Turbulence”, Section 10.4: “The Standar, RGN, and Realizable k- ϵ Models”.
- [16] R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot. “Fenomenos de trasporte”, Ed. Reverte, 2006.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Esquema de las rutas de producción de acero [1].

Figura 2. Esquema de horno eléctrico de arco de corriente directa [3].

Figura 3. Posición de los jets de oxígeno dentro del horno eléctrico de arco [4].

Figura 4. Evolución en el consumo de energía eléctrica y electrodos en el horno eléctrico de arco en función de los avances tecnológicos [5].

Figura 5. Aumento en la producción de acero en horno de arco eléctrico con respecto al total de la producción mundial [6].

Figura 6. Consumo de oxígeno contra consumo de energía eléctrica [7].

Figura 7. Esquema de un jet gaseoso incidiendo sobre un baño líquido [8].

Figura 8. Tipos de deformación de la superficie libre [8].

Figura 9. Función corriente (izquierda) y vectores de velocidad (derecha) [8].

Figura 10. Efecto de la tasa de flujo en la penetración del jet [10].

Figura 11. Efecto de la densidad del líquido en la penetración del jet [10].

Figura 12. Flujo de agua como función del flujo de aire del chorro [11].

Figura 13. Flujo de agua como función de la altura vertical de lanza [11].

Figura 14. Mediciones experimentales de un campo de velocidades en el líquido afectado por la incidencia de un jet gaseoso [12].

Figura 15. Cálculos realizados por Szekely que buscan reproducir las mediciones de la figura 14 [13].

CAPÍTULO 2

Figura 16. Representación esquemática del sistema de estudio.

Figura 17. Geometría del sistema a partir de los volúmenes generados.

Figura 18. Discretización del sistema.

Figura 19. Condiciones de frontera implementadas en GAMBIT.

Figura 20. Esquema de la altura y ángulo de la incidencia del jet.

CAPÍTULO 3

Figura 21. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 60 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.

Figura 22. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 80 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.

Figura 23. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 50°.

Figura 24. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 60°.

Figura 25. Secuencia en un sistema donde el flujo de gas es de 100 l/min y el ángulo de incidencia del jet es de 75°.

Figura 26. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad variando el flujo de gas: (a) 60 l/min, (b) 80 l/min y (c) 100l/min. Y un ángulo de lanza constante de 60°.

Figura 27. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad variando el ángulo de lanza: (a) 50°, (b) 60° y (c) 75°. Y un flujo de gas constante de 80 l/min.

Figura 28. Resultados del modelo matemático para la geometría de la cavidad ((a) 60 l/min; 50°, (b) 80 l/min; 50°, (c) 100 l/min; 50°, (d) 60 l/min; 60°, (e) 80 l/min; 60°, (f) 100 l/min; 60°, (g) 60 l/min; 75°, (h) 80 l/min; 75°, (j) 100 l/min;75°).

Figura 29. Comparación entre resultados numéricos obtenidos usando la correlación propuesta por Wakelin contra el comportamiento teórico de dicha correlación.

Figura 30. Cavidades típicas predichas en un baño bifásico (Izquierda) contra cavidades típicas predichas en un baño monofásico (Derecha), teniendo como

variable el flujo de gas (60 l/min **(a)**, 80 l/min **(b)** y 100 l/min **(c)**) manteniendo un ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 31. Cavidades típicas predichas en un baño bifásico (Izquierda) contra cavidades típicas predichas en un baño monofásico (Derecha), teniendo como variable el ángulo de lanza: **(a)** 60° y **(b)** 75°, un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 32. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico de la profundidad de la depresión en función del flujo de aire y con un ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 33. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico del diámetro de la depresión en función del flujo de aire y con un ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 34. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico de la profundidad de la depresión en función del ángulo de lanza y con un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 35. Comparación entre un sistema monofásico y uno bifásico del diámetro de la depresión en función del ángulo de lanza y con un flujo de gas de 80 l/min, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 36. Perfiles de velocidad obtenidos mediante el modelo matemático variando el flujo de gas (**(a)** 60 l/min, **(b)** 80 l/min y **(c)** 100l/min) y un ángulo de lanza constante de 60°.

Figura 37. Perfiles de velocidad obtenidos mediante el modelo matemático variando el ángulo de lanza (**(a)** 50°, **(b)** 60° y **(c)** 75°) y un flujo de gas constante de 80 l/min.

Figura 38. Perfil de velocidad predicho en un baño bifásico (izquierda) contra perfil de velocidad predicho en un baño monofásico (derecha) con las siguientes condiciones de operación: flujo de gas de 80 l/min, ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

Figura 39. Patrones de recirculación obtenidos mediante el modelo matemático variando el flujo de gas ((a) 60 l/min, (b) 80 l/min y (c) 100l/min) y un ángulo de lanza constante de 60°.

Figura 40. Patrones de recirculación obtenidos mediante el modelo matemático variando el ángulo de lanza ((a) 50°, (b) 60° y (c) 75°) y un flujo de gas constante de 80 l/min.

Figura 41. Patrones de recirculación en un baño bifásico (izquierda) contra el patrón de recirculación de un baño monofásico (derecha) con las siguientes condiciones de operación: flujo de gas de 80 l/min, ángulo de lanza de 60°, una altura entre tobera y baño líquido de 50mm y diámetro de boquilla de 1.58 mm.

LISTA DE SIMBOLOS

Fr , número de Froude.

g , constante gravitacional (m/s^2).

G_k , generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad.

G_b , generación de energía cinética turbulenta debido a la fuerza boyante.

h , altura de lanza (m).

h' , profundidad de la depresión (m).

I , intensidad de la turbulencia.

Jz , rapidez de transferencia de cantidad de movimiento del chorro gaseoso.

k , energía cinética turbulenta.

L , diámetro a través del cual circula el fluido o longitud característica del sistema (m).

P , presión.

R_o , radio de curvatura de la depresión (m).

Re , número de Reynolds.

t , tiempo (s).

v , vector velocidad del fluido.

V_g , velocidad del jet (m/s).

V_m , velocidad en la boquilla (m/s).

w , flujo de gas (Kg/s)

We , número de Weber.

z , longitud que recorre el chorro de aire desde la tobera hasta el baño líquido (m).

α , ángulo de incidencia del jet.

ϵ , disipación de la energía cinética turbulenta.

ρ_g , densidad del gas (kg/m^3).

$\rho_{líq}$, densidad del líquido (kg/m^3).

σ , tensión superficial.

σ_k σ_ϵ , números de Prandtl turbulentos para k y ϵ respectivamente.

μ , viscosidad media (Kg/ms).

μ_g , viscosidad cinemática (Kg/ms).

μ_t , viscosidad turbulenta (Kg/ms).

Γ_ϕ , coeficiente de difusión.

S_ϕ , termino fuente.

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 1. Propiedades físicas de los fluidos.

Tabla 2. Condiciones para cada cálculo.

CAPÍTULO 3

Tabla 3. Densidades los líquidos dentro del baño y densidad promedio.

Tabla 4. Resultados obtenidos al aplicar la correlación de Wakelin.

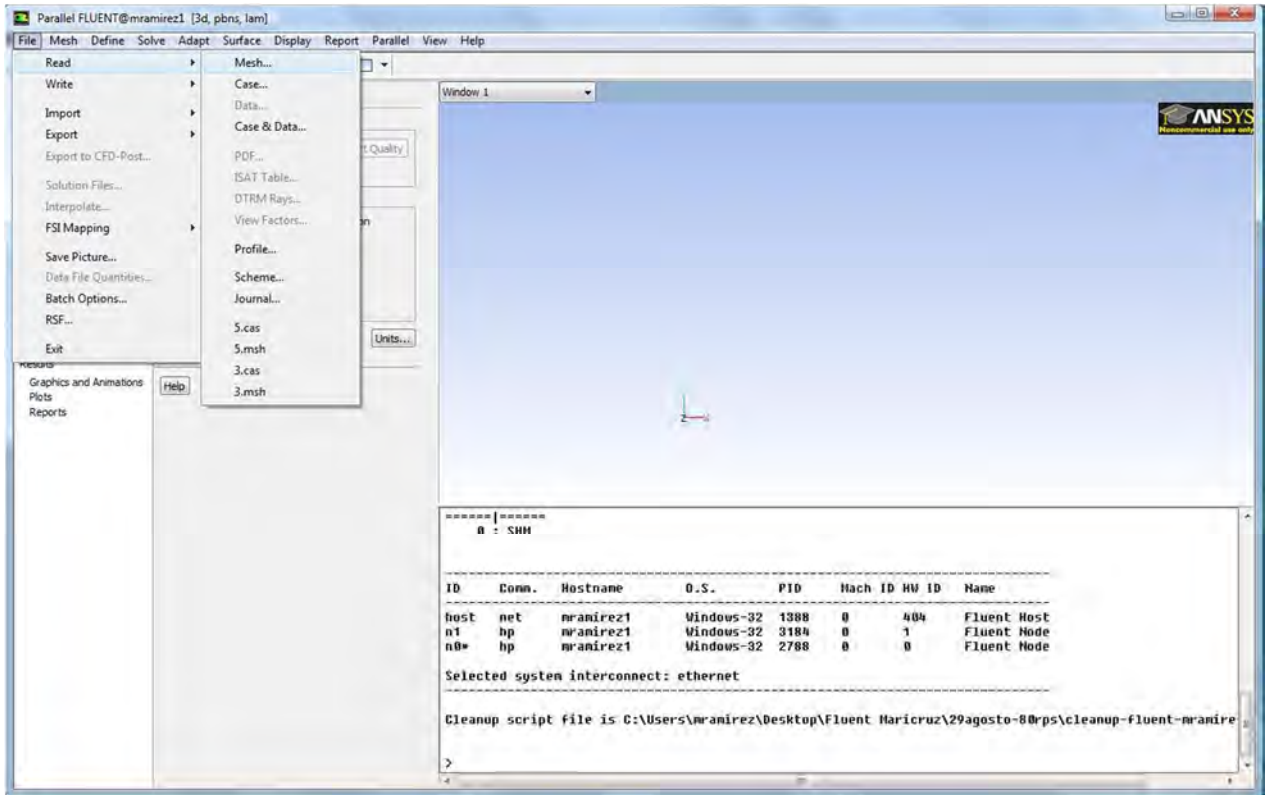
ANEXO 1

Manual para realizar un cálculo en ANSYS FLUENT™ 12.0.16.

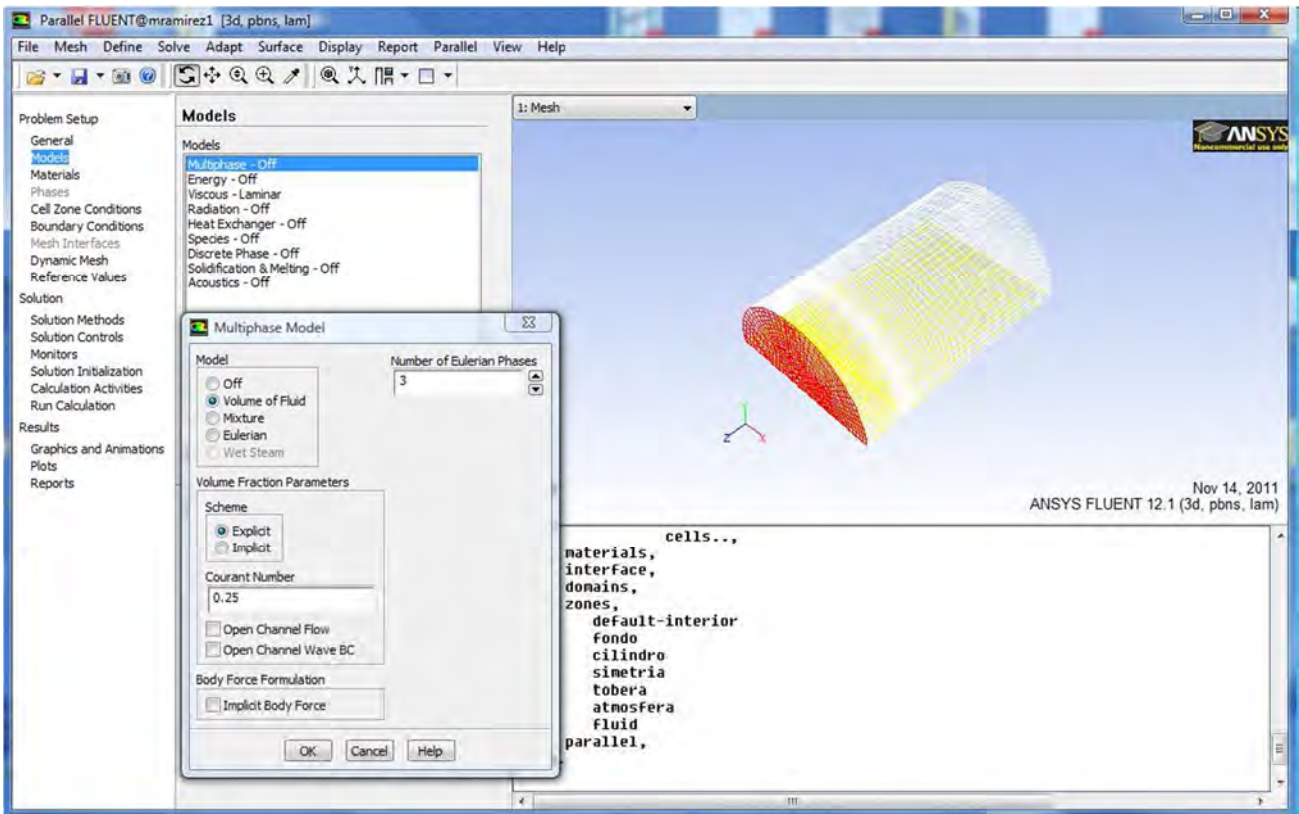
Primero que nada como ya se mencionó en el capítulo 2, se debe realizar una malla que describa el sistema bajo estudio, una vez que se tiene realiza el mallado del sistema se pasa al software ANSYS FLUENT™ 12.0.16. para realizar el cálculo numérico.

1. Abrir el programa ANSYS FLUENT™ 12.0.16. y seleccionar la dimensión del sistema en estudio que en ese caso en 3D, los demás parámetros se dejan tal y como aparecen
2. Una vez abierto el software, seleccionamos la opción **File**, donde nos aparecerá otra ventana y seleccionaremos **Read**, y por último de la ventana que se desprenda seleccionaremos la opción **Mesh**, que nos llevara directamente a una ventana donde te pedirá que abras la malla que realizaste para que el programa pueda abrirla.

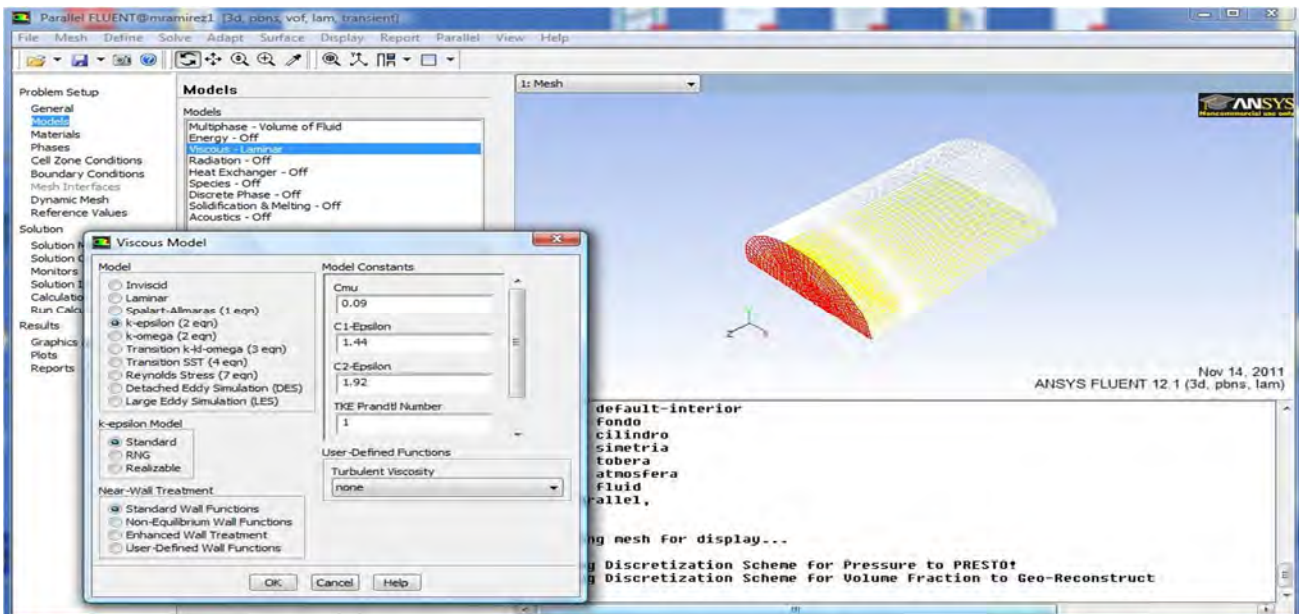




- Una vez que el software lea la malla seleccionaremos la opción **Models / Multifase** y seleccionaremos **tres** fases y el modelo **Volume of Fluid**, lo demás se queda tal y como esta.

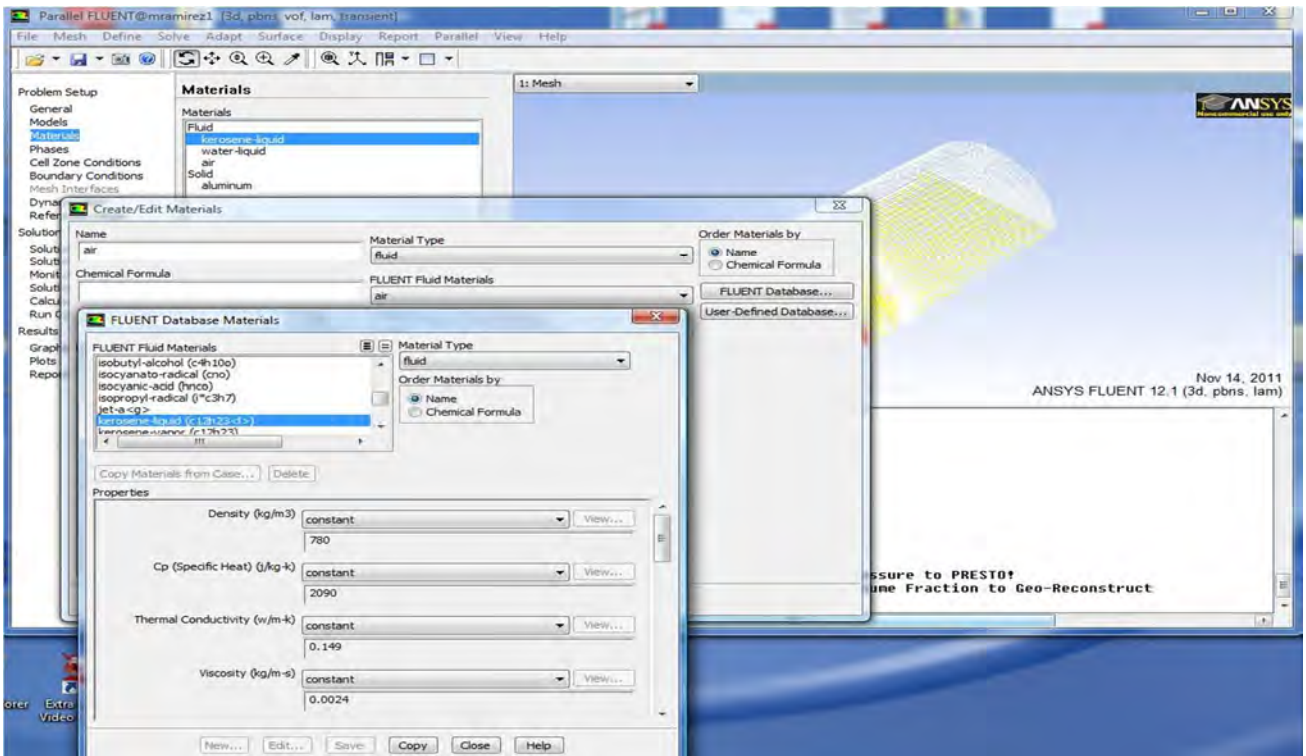


4. Ahora seleccionaremos la opción **Viscous** y seleccionaremos el modelo **K-epsilon**, las demás ventanas se quedaran con sus valores predeterminados.

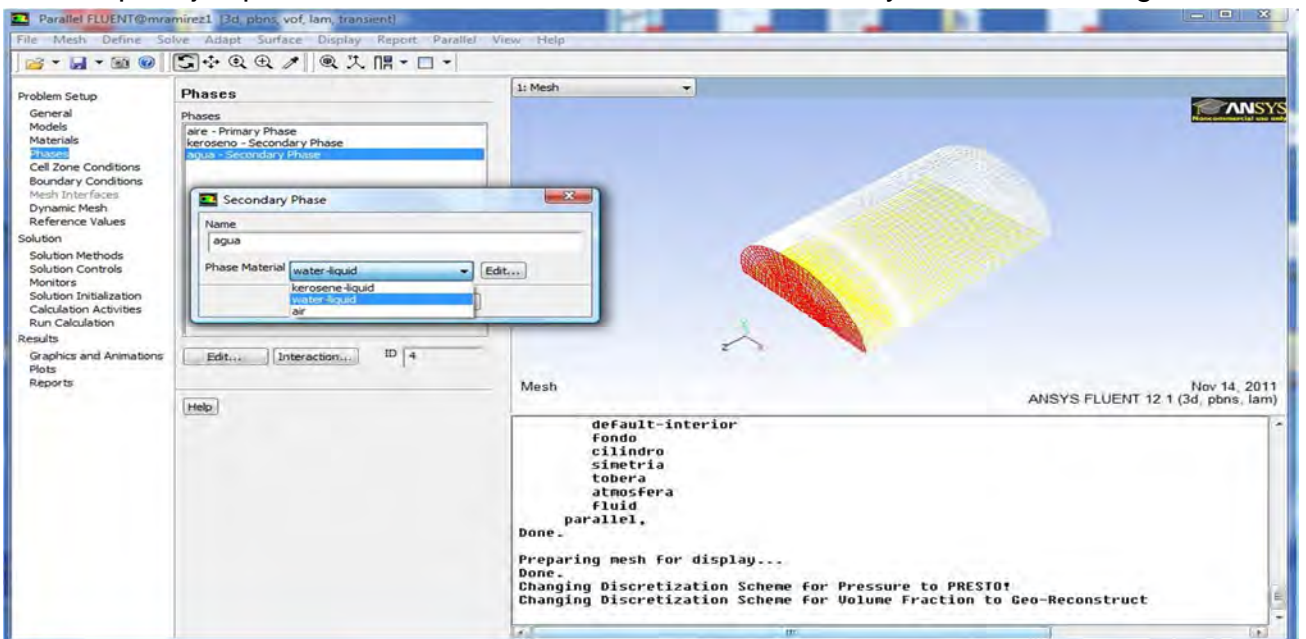


5. Posteriormente seleccionaremos la opción **Materials**, donde se abrirá otra ventana y seleccionaremos la opción que dice **Fluent Data Base**, en donde

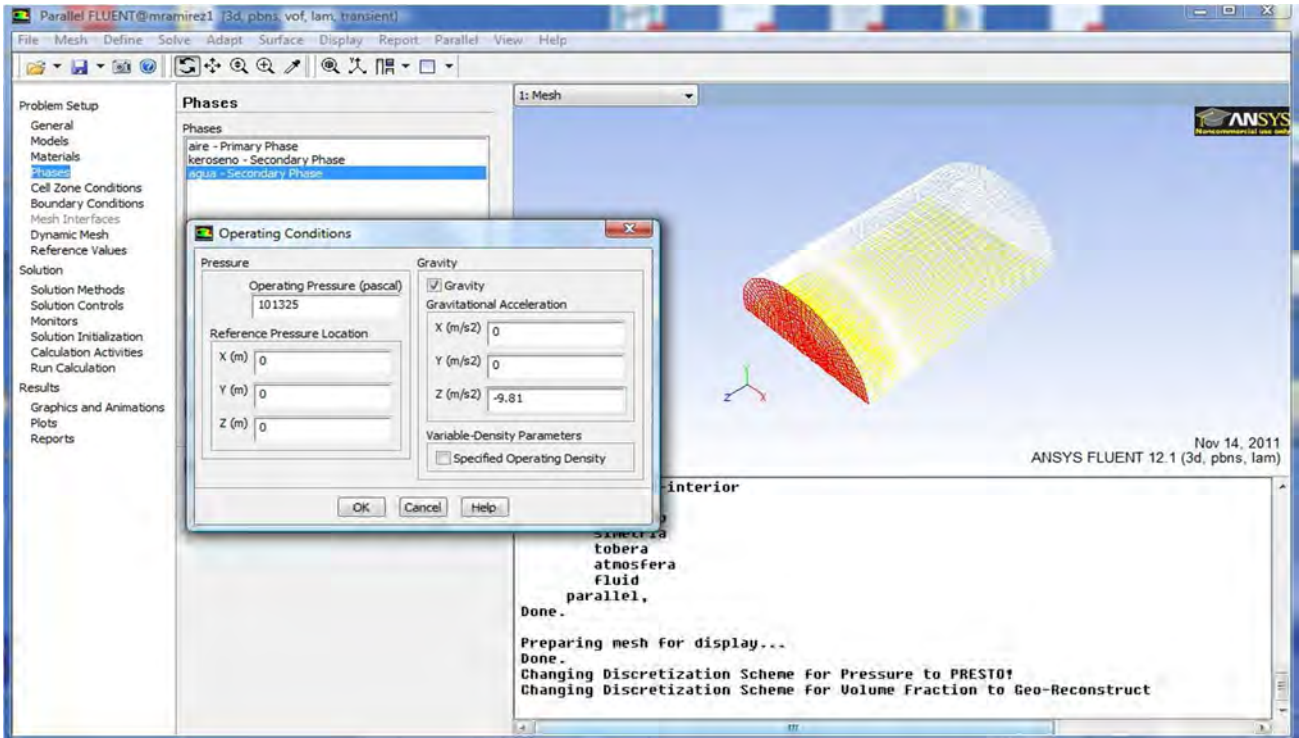
nos saldrá una lista de materiales que podemos utilizar en el software, como en este caso nuestro trabajo se realizó con agua, aire y keroseno seleccionaremos cada uno y daremos en la opción **Copy**.



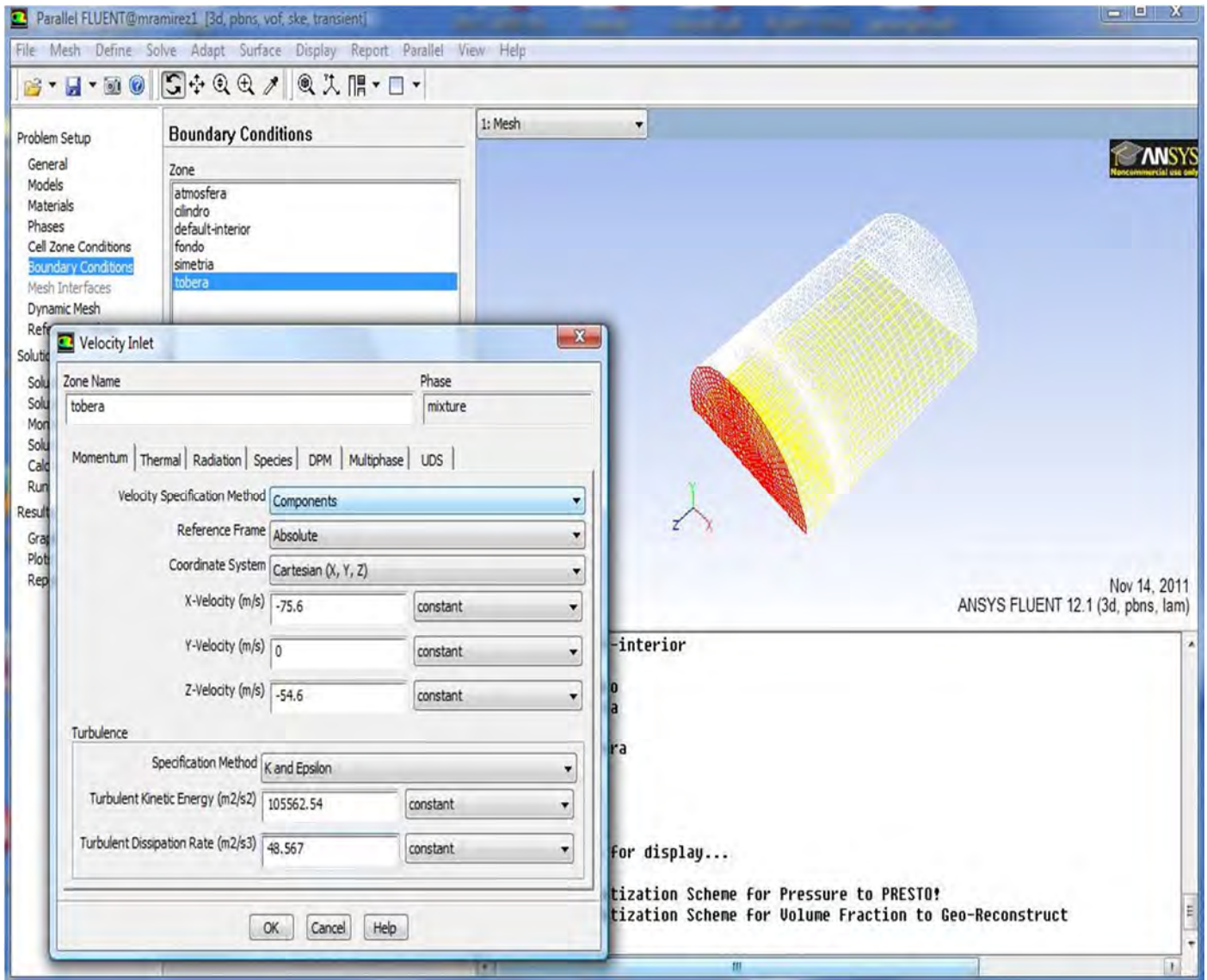
6. Una vez seleccionados los materiales con que vamos a trabajar, nos vamos a la opción **Phases**, donde seleccionaremos a que corresponde cada fase, por ejemplo la fase 1 es aire, la fase dos es keroseno y la fase tres es agua.



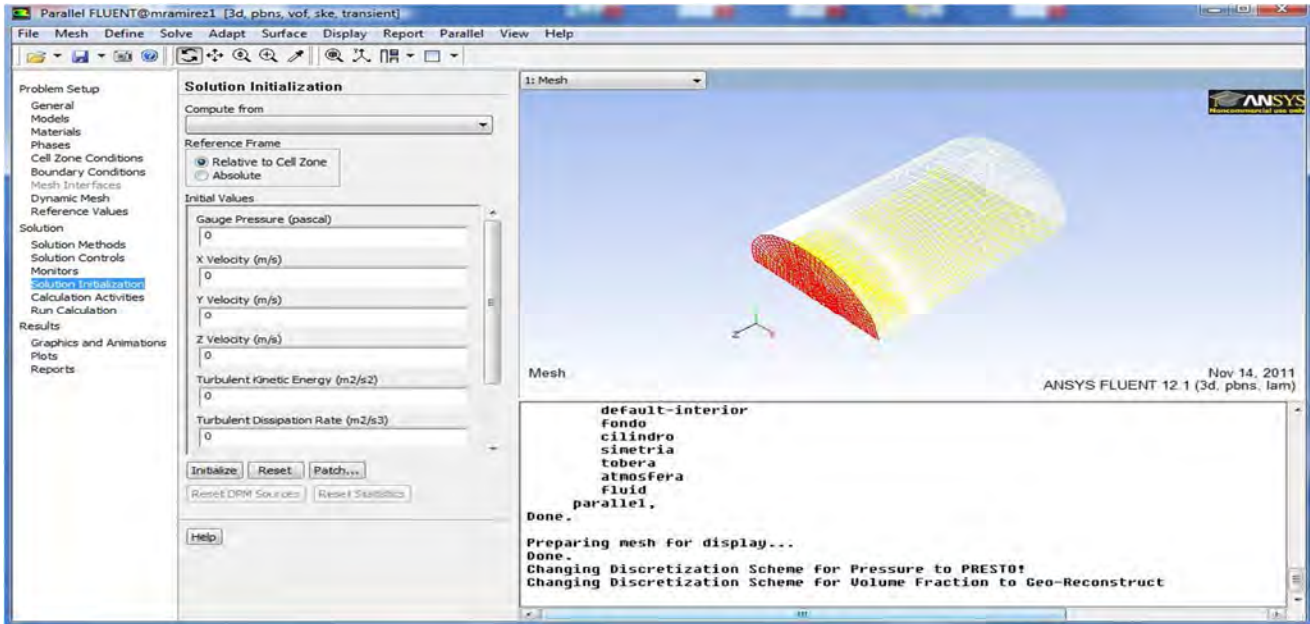
7. Una vez hecho esto, pasamos a la opción **Define / Operating Conditions**, y en esta nos aparecerá una ventana donde seleccionaremos la opción **Gravity**, y posteriormente pondremos su valor en el eje de las z, ya que la fuerza de gravedad actúa en esa dirección sobre nuestro sistema, además de que el signo es negativo, ya que en este caso la dirección de la gravedad apunta hacia abajo, las demás opciones se quedan igual.



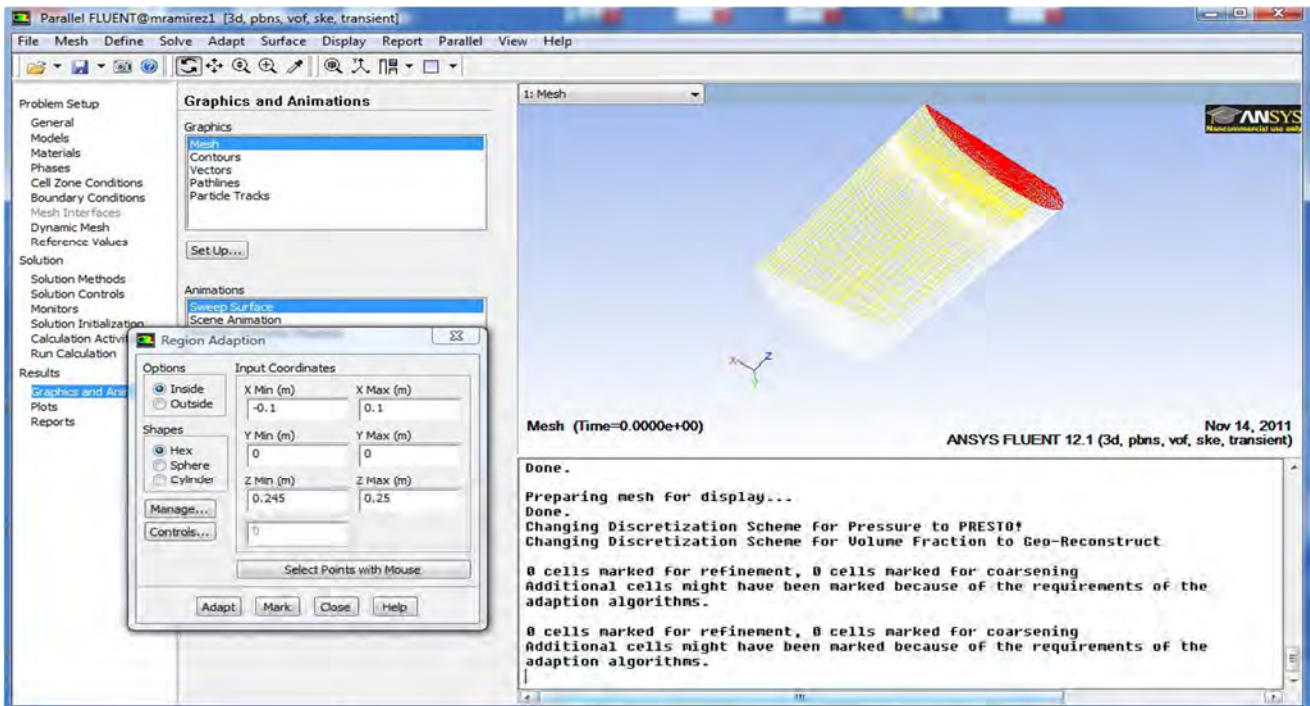
8. Ahora pasaremos a la opción **Boundary Conditions**, en este caso cuando se realizó la malla se dieron las condiciones de frontera y la tobera de donde sale el chorro de aire del sistema se dejó con el nombre de tobera, así que seleccionaremos esta opción que es donde se dan los valores de la velocidad de salida de aire, además de los valores de K y e respectivamente, además como el chorro de aire tiene una inclinación por lo que la velocidad tiene dos componentes, seleccionaremos la pestaña que dice **Velocity Specification Method** y pondremos la opción que dice **Components**, una vez seleccionada esta opción se abrirán las pestañas de las componentes de velocidad, y solo faltará anotar los valores de estas y de k y e respectivamente.



- Ahora se seleccionara la opción **Solve / Initialization**, donde se abrirá una ventana con valores predeterminados y colocarlos todos en cero, una vez que todos los valores estén en cero dar doble click en la pestaña **Initialize**.

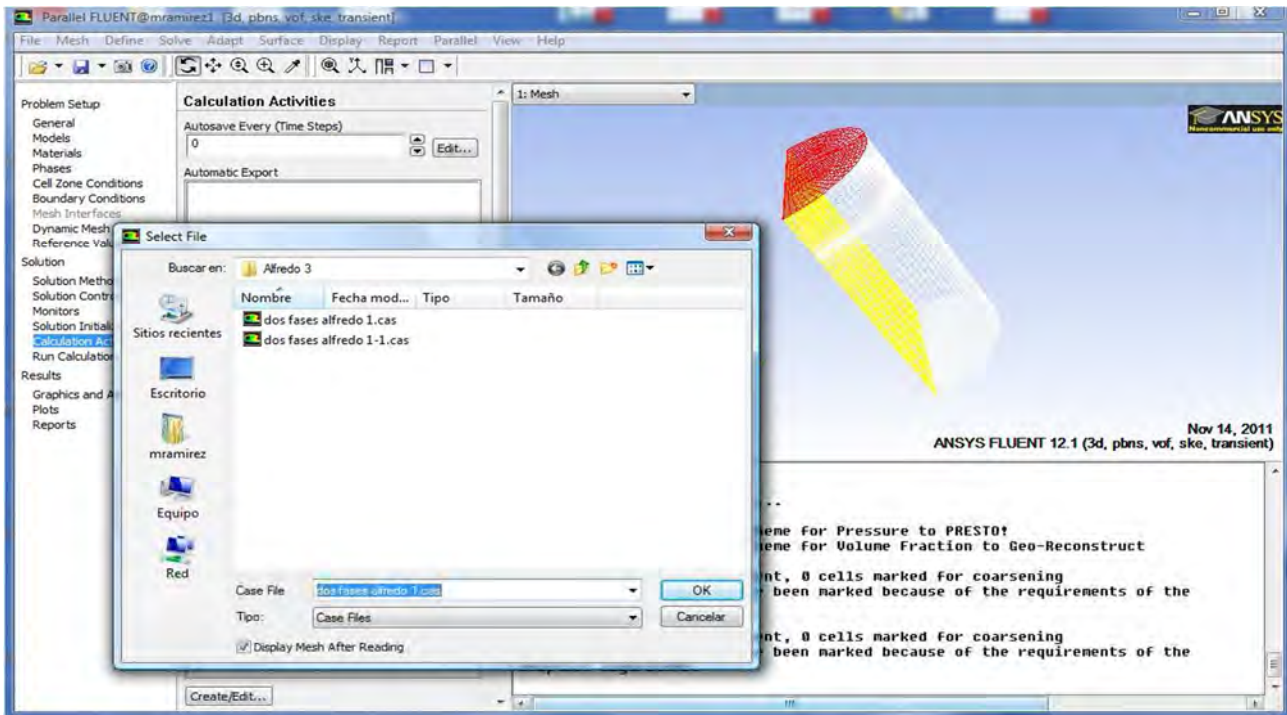


10. Ahora seleccionamos la opción **Adap / Region**, donde saldrá una ventana con las componentes x, y, z, este menú lo que nos permite es separar nuestro sistema en partes, pedazos o volúmenes, en este caso se separó los volúmenes donde debía de estar colocada el agua, el keroseno y el aire, cada que se seleccionan las coordenadas de un volumen se debe dar click en la opción **Mark** para que este quede guardado.



11. Una vez que ya dividimos nuestro sistema en volúmenes, lo lógico sería seleccionar que hay en cada uno de ellos por eso es que nos vamos a la

13. Posteriormente seleccionamos **File / Write / Case and Data**, donde aparecerá una ventana, pidiéndote donde quieres que se guarden los resultados.



14. Finalmente seleccionas la opción que dice **Solve / Run Calculation**, donde meterás los valores de paso de tiempo, que en estos cálculos fue de 0.0001 segundos y el número de datos que quieres obtener que en este caso fue de 100000 datos y das click a la pestaña **Calculate**, para correr el cálculo.

