



---

### Análisis de la eficiencia de un horno de fundición basculante con Flow-Simulation

*Marco Antonio Díaz Martínez, Reina Verónica Román Salinas, Ricardo Zarate Cruz*

Instituto Tecnológico Superior de Pánuco

marco.diaz@itspanuco.edu.mx

#### RESUMEN

La mejora continua en un proceso de fabricación permite que la simulación desempeñe un papel importante en la prevención de errores y atrasos que ocurren en el transporte de un producto. El modelado y la simulación de un proceso de fabricación mediante el uso del software Flexsim y SPSS analizarán los impactos positivos o negativos que puede tener la implementación de un análisis con ayuda de una distribución Erlang de acuerdo con ciertos parámetros iniciales del proceso. Con los resultados obtenidos se podrá tomar mejores decisiones sobre la distribución probabilística que sería la más adecuada a implementar en el proceso de fabricación y así tener la mejor eficiencia del sistema.

#### INTRODUCCIÓN

La simulación de flujo computarizado (flow simulation) ganó la aclamación con la expansión de la logística y como resultado del poder de cálculo que las computadoras ahora han alcanzado. Se pueden modelar todos los tipos de flujo, ya sean discretos o continuos, y muchas empresas utilizan estas herramientas de simulación en lugar de sistemas o prototipos físicos para los cuales se requerirían inversiones (Réveillac, 2015). Actualmente en el área de procesos de manufactura se han realizado investigaciones y trabajos relacionados con la práctica de la fundición. En el trabajo con hornos de fundición el metal debe calentarse hasta alcanzar el estado líquido para verterlo o forzarlo de algún modo a que pase al molde. El calentamiento y la fusión se llevan a cabo en un horno (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015). En la actualidad existe una metodología novedosa para la simulación del sistema de captación y enfriamiento de los gases de fundición mediante el uso de sistemas computacionales que tienen herramientas de apoyo a la simulación mecánica de fluidos, aplicando gases

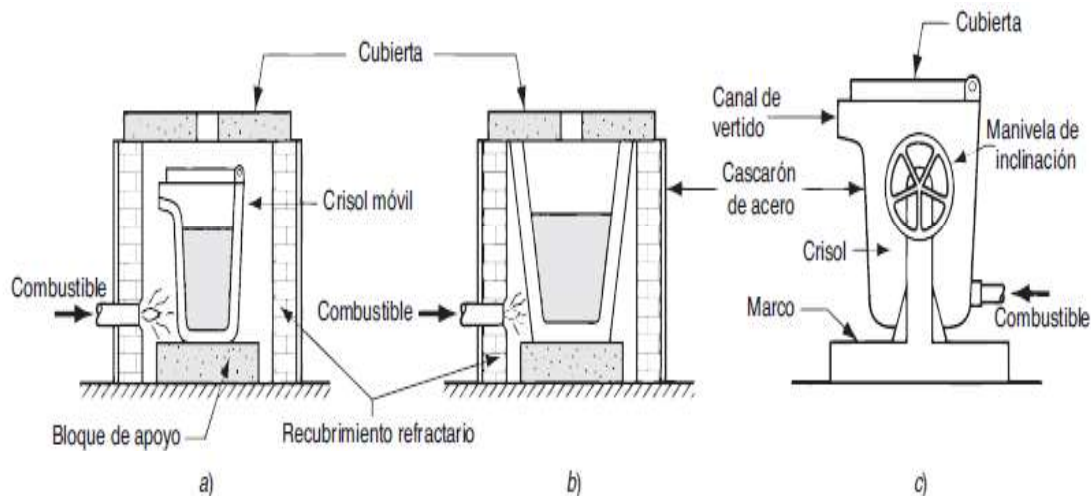
provenientes de un convertidor de cobre tipo Teniente, donde se propone una serie de suposiciones que permite adaptar los modelos físicos para su simulación y validación de resultados mediante instrumentos a escala real (Pérez, Aguilera, Hurtado, & Vargas, 2017). Nuevos sistemas y tecnologías industriales han traído aportaciones relevantes a la ingeniería industrial y procesos de manufactura ya que pueden dar resultados en tiempo real y prevenir posibles fallas o mantenimientos que exijan demasiado tiempo de espera y en algunos casos hasta un paro del proceso completo. Otra de las bondades de la simulación de procesos industriales enfocada a la fundición es la evaluación de propiedades elásticas de la fundición nodular empleando micromecánica computacional, para la estimación del comportamiento se utiliza el método de homogeneización asíntota. Este método se aplica a celdas tridimensionales y bidimensionales que se analizan mediante el método de elementos finitos (MEF) y para la determinación del elemento de volumen representativo (RVE) (Rodríguez, dardati, Godoy, & Celentano, 2015). Estudios que describen modelos híbridos hidrostáticos y no hidrostáticos realizados en flow simulation, para aumentar la eficiencia de la simulación de flujos de aguas poco profundas. El modelo numérico básico es un modelo hidrostático tridimensional resuelto por el método de volumen finito (FVM) aplicado a rejillas no estructuradas. Aquí, se adoptan esquemas de disminución de variación total usando un método predictor-corrector para calcular la presión no hidrostática y extendiendo el modelo uno completamente hidrodinámico (Zhang, Liang, & Liu, 2018). Un paso importante de la herramienta de flow simulation en el análisis de incertidumbre es el análisis de sensibilidad de varios parámetros de entrada de incertidumbre (Hu & Kozlowski, 2018). Con flow simulation (Y & Akamatsu, 1991) se puede presentar un método eficiente de límite sumergido (IB) para la simulación numérica directa del flujo del fluido más allá de un par de cilindros circulares y flujos de partículas rígidas (Lo, Lee, & Lin, 2018). También existen nuevos modelos numéricos como vórtices discretos donde la difusión viscosa es producida por el movimiento de los vórtices estimulado por la velocidad de difusión introducida. Otro de los enfoques novedosos para simulaciones de flujo completamente en 3D en medios porosos con redes de fracturas sumergidas se basa en el modelo discreto de fractura y matriz, en el que las fisuras se presentan como objetos

bidimensionales en matriz porosa tridimensional y su objetivo es permitir un proceso de mallado fácil, independiente de la complejidad geométrica del dominio, y de una herramienta de resolución robusta y eficiente, confiando en un fuerte paralelismo (Berrone, Pieraccini, & Scialo, 2017). La simulación de flujos también presenta un modelo de cierre para calcular el flujo turbulento sobre y a través de medios porosos. El modelo se basa en los términos Darcy y Forchheimer, que también se aplican a un modelo de estrés de Reynolds. La implementación del modelo en un solucionador de flujo se valida con experimentos de túnel de viento de un ala 2D con un borde posterior poroso. Presión y las mediciones PIV se realizan para la determinación de coeficientes de fuerza integrales y la comprensión del campo de flujo detallado. Los datos de medición se discuten y se comparan con los resultados de los cálculos numéricos. Las simulaciones coinciden muy bien con la mayoría de los experimentos y reproducen correctamente los fenómenos de flujo (Mobner & Radespiel, 2017). Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y transferencia de masa integradas proporcionan información espacial y temporal completa sobre el campo de concentración dentro del reactor, que permite la cuantificación del coeficiente de transferencia de masa en función del tiempo y las condiciones de funcionamiento (Yang, Remacha, & Jensen, 2017). Actualmente existen muchos sistemas de modelación y simulación de procesos, sin embargo, muy pocos sistemas pueden adaptarse a la industria 4.0 y el ITo (Internet de las cosas), es decir, tener un control en tiempo real antes de que un horno de fundición sea construido o puesto en marcha. Es por eso que este trabajo está enfocado a diferentes ramos de la ingeniería industrial que implique el trabajo con altos hornos de fundición y procesos de manufactura como el proceso de metalurgia de polvos o proceso de sinterizado, por mencionar algunos. En esta investigación se utilizará el software Solidworks- Flow Simulation donde se modelará y simulará un horno de crisol basculante identificando su eficiencia y analizando las variables que tienen un impacto real antes de su construcción. Esto traerá beneficios hacia las empresas del ramo de manufactura donde podrán tomar las mejores decisiones.

## . METODOLOGÍA

### **Características de los Hornos de Fundición**

Estos hornos funden el metal sin que tenga contacto directo con la mezcla combustible. Por esta razón en ocasiones se les llama hornos de combustible indirecto. En las fundidoras se utilizan tres tipos de crisoles como los que se muestran en la figura 1 y todos emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura para contener la carga.



**Figura 1-** Tipos de crisoles: a) crisol móvil, b) crisol basculante y c) crisol de volteo (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015).

En el horno de crisol móvil éste se coloca en un horno y se calienta lo suficiente para derretir la carga del metal. Los combustibles comunes para estos hornos son petróleo, gas o carbón en polvo. Cuando el metal se derrite el crisol se derrite fuera del horno y se usa como cuento vertido. El horno de crisol basculante (figura 2), es un horno estacionario y el metal fundido se extrae del contenedor con un cucharón. Son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación, como se observar en la figura 3. La ventaja aparente que otorga el horno de crisol basculante es la capacidad que tiene éste de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno. Usualmente se les utiliza cuando es

necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente en los moldes.

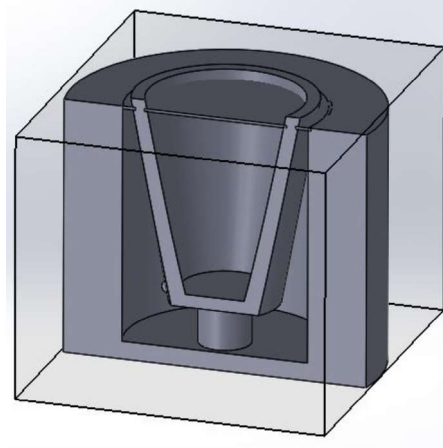


Figura 2- Diseño de un horno de fundición de crisol basculante en Flow-Simulation

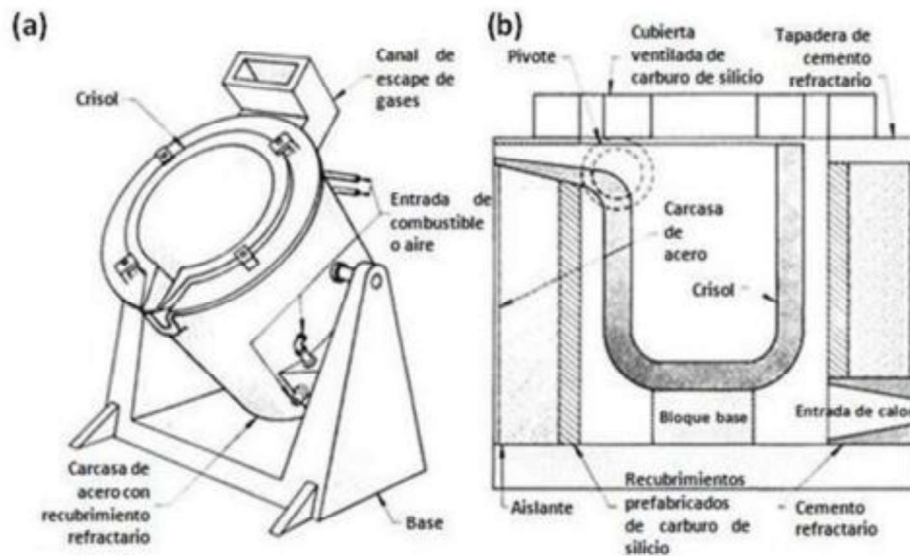
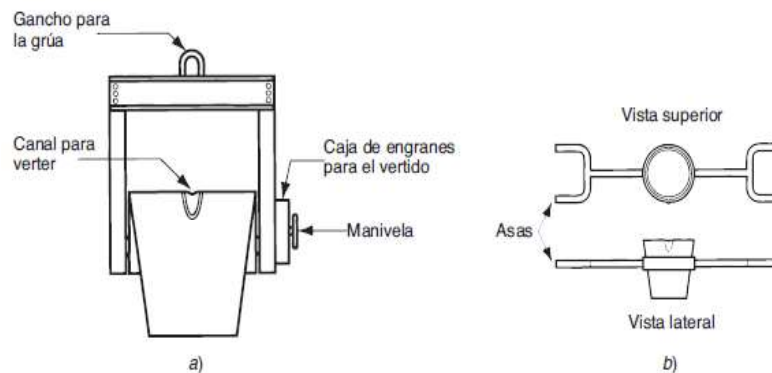


Figura 3- Horno de crisol basculante: a) Eje en el centro de gravedad, y b) Eje al nivel de la boquilla (Kearn, 1992).

### Vertido, limpieza y tratamiento térmico

En ocasiones se lleva el metal derretido del horno de fundición al molde por medio de crisoles. Con más frecuencia, la transferencia se lleva a cabo por medio de **cuencos** de varias clases. Estos cuencos reciben el metal del horno y permiten que se viertan de manera conveniente en los moldes.



**Figura 4-** Dos tipos comunes de cuencos: a) cuenco de grúa, b) cuenco para dos hombres (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015).

En la figura 4 se ilustran dos cuencos comunes, uno para manejar volúmenes grandes de metal derretido por medio de una grúa elevada (a) y el otro es un “cuenco para dos hombres” (b) para moverlo en forma manual y verter cantidades pequeñas. Uno de los problemas del vertido es que podría introducirse metal fundido oxidado al molde. Los óxidos de metal reducen la calidad del producto y quizás hagan que el fundido sea defectuoso, por lo que se toman medidas para minimizar la entrada de estos óxidos en el molde durante el vertido. En ocasiones se emplean filtros para capturar los óxidos y otras impurezas conforme se vierte el metal desde el canal, y se emplean fundentes para cubrir el metal derretido a fin de retardar la oxidación. Además, se han creado cuencos para verter el metal líquido desde el fondo, ya que los óxidos se acumulan en la superficie. Después de que el fundido se ha solidificado y retirado del molde, por lo general se requiere cierto número de etapas adicionales. Estas operaciones incluyen 1) recortar, 2) retirar el núcleo, 3) limpiar las superficies, 4) inspeccionar, 5) reparar, si se requiriera, y

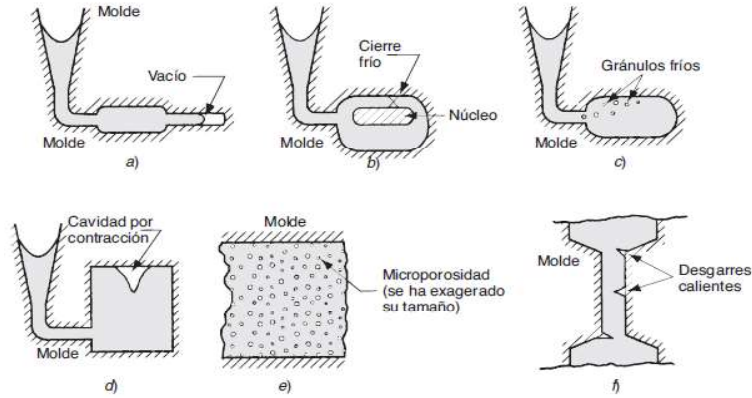
6) dar tratamiento térmico. En las fundidoras, se conoce al conjunto de las etapas 1 a 5 como “limpieza”. El grado en que se requieren estas operaciones adicionales varía según los procesos de fundido y los metales. Cuando se necesitan, por lo general son intensivas en mano de obra y costosas (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015). Es frecuente que los fundidos reciban tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades, ya sea con operaciones subsecuentes tales como maquinarse o resaltar las propiedades que desean para la aplicación de la pieza en el servicio (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015).

#### *Calidad y defectos de fundido*

Existen muchas maneras de que los procedimientos no ocurran adecuadamente en una operación de fundición, lo que da como resultado defectos de calidad del producto. A continuación, se mencionan los defectos más comunes que sobrevienen durante el fundido y se indican los procedimientos de inspección para detectarlos (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015). Todos estos observables en la figura 5.

- a) Vacíos. son fundidos que se solidifican antes de llenar por completo la cavidad de molde. Las causas más comunes son: 1) Mala fluidez del metal derretido, 2) temperatura muy baja del vertido, 3) Velocidad del vertido muy despacio, 4) La cavidad del molde muy delgada.
- b) Cierres fríos. Surge cuando dos porciones de metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura.
- c) Gránulos fríos Glóbulos sólidos que quedan atrapados en el fundido.
- d) Cavidad de fuga. Vacío interno en el fundido ocasionado por fugas en la solidificación que restringen la cantidad de metal.
- e) Microporosidad. Consiste en una malla de pequeños vacíos distribuidos en el fundido, ocasionados por la falta de solidificación.
- f) Desgarre caliente. Ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación. El defecto se manifiesta como la separación del metal (de ahí los términos desgarre y

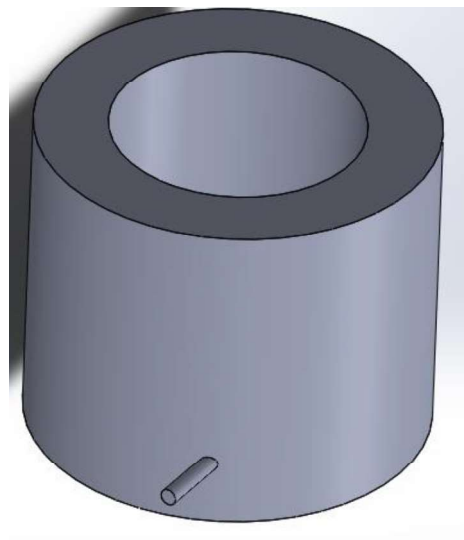
agrietamiento) en un punto de esfuerzo grande a la tensión ocasionado por la incapacidad del metal de contraerse en forma natural.



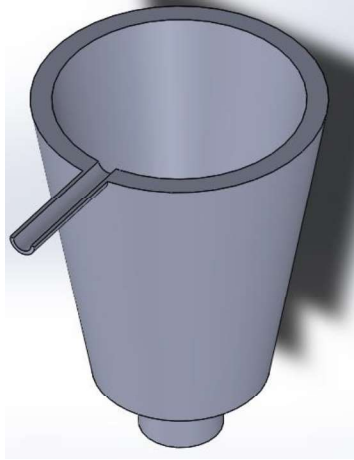
**Figura 5-** Algunos defectos comunes de los fundidos: a) vacíos, b) cierre frío, c) cavidad por contracción, microporosidad y f) desgarre caliente (Groover, Barrientos, León, & Reyes, 2015).

### Modelado y simulación de un horno de crisol basculante

Un modelo de horno de crisol basculante se construye mediante el uso de la herramienta Solidworks- Flow simulation, tal como se muestra en la figura 6 y figura 7. El modelo cilíndrico correspondiente al horno de fundición tiene un diámetro de 1.2 metros, 1 metro de altura y un vaciado de 0.22 metros.

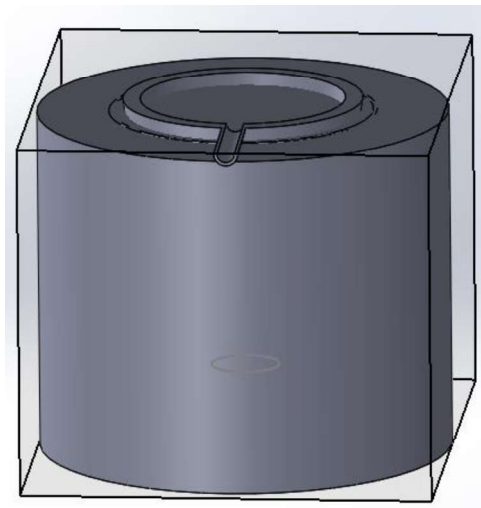


**Figura 6-** Modelo tridimensional del horno de fundición basculante sin crisol.



**Figura 7-** Modelo tridimensional del crisol

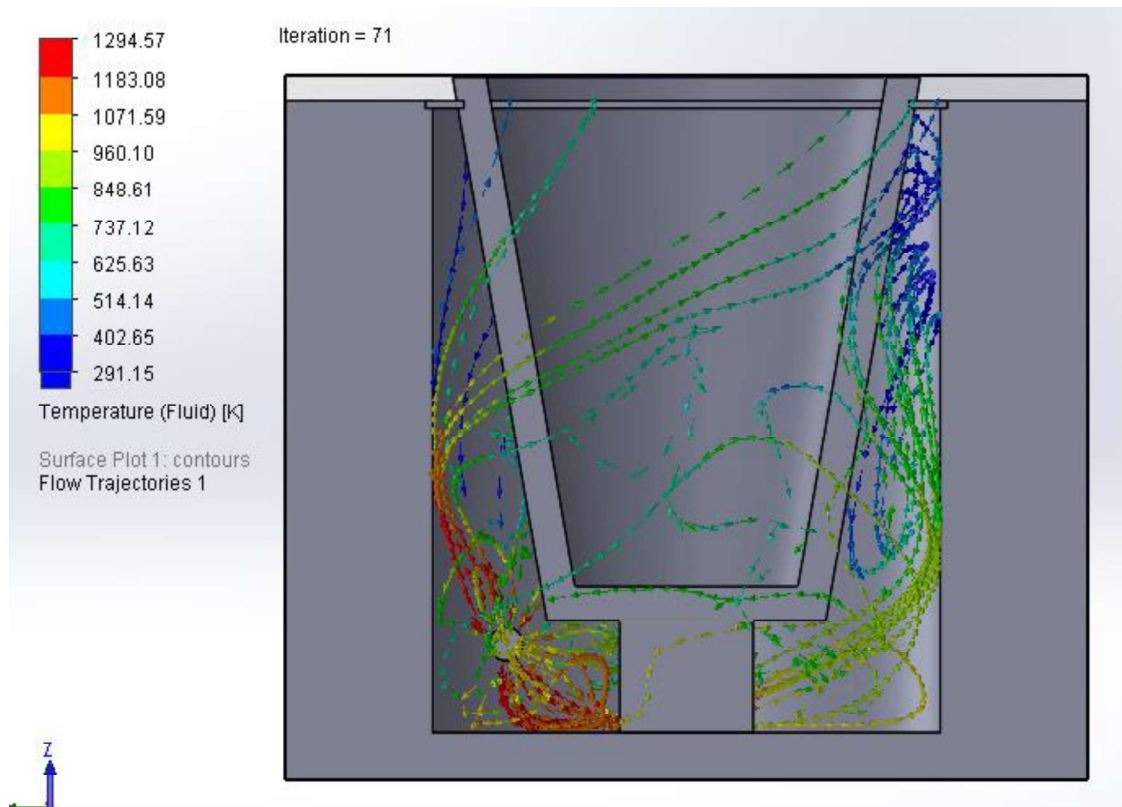
El modelado del crisol tiene un diámetro superior de 0.8 metros y 10 grados de ángulo en el diámetro inferior, se tiene un vaciado interior de 0.05 metros, un vertedero de 0.05 metros de diámetro y una distancia de interior a exterior de 0.3 metros de longitud. En la parte inferior del crisol se tiene una reducción (base) 0.2 metros de diámetro y una extrusión saliente de 0.2 metros. Habiendo diseñado el horno y el crisol se dispone a ensamblar ambas piezas para completar el horno de fundición basculante como se muestra en la figura 8 y poder realizar las pruebas y análisis correspondientes.



**Figura 8-** Ensamblaje de Horno y crisol tridimensional.

## Pruebas y análisis de resultados

A continuación, el horno de fundición de crisol basculante será expuesto a diferentes condiciones como temperatura, presión, velocidad del fluido, densidad del fluido, densidad del sólido y así poder analizar su eficiencia antes de su construcción física. Los parámetros termodinámicos a los que está expuesto el horno es de 101325 Pa y una temperatura de 293.2 K, un abanico (Fan) de tipo R2E 133-BH66-07. También se manejarán trayectorias estáticas dentro del horno y se ingresó gas propano en su interior (figura 9). El tipo de flujo es laminar y turbulento, la compresión del líquido viene predefinido con agua.



**Figura 9-** Trayectorias del fluido dentro del horno basculante.

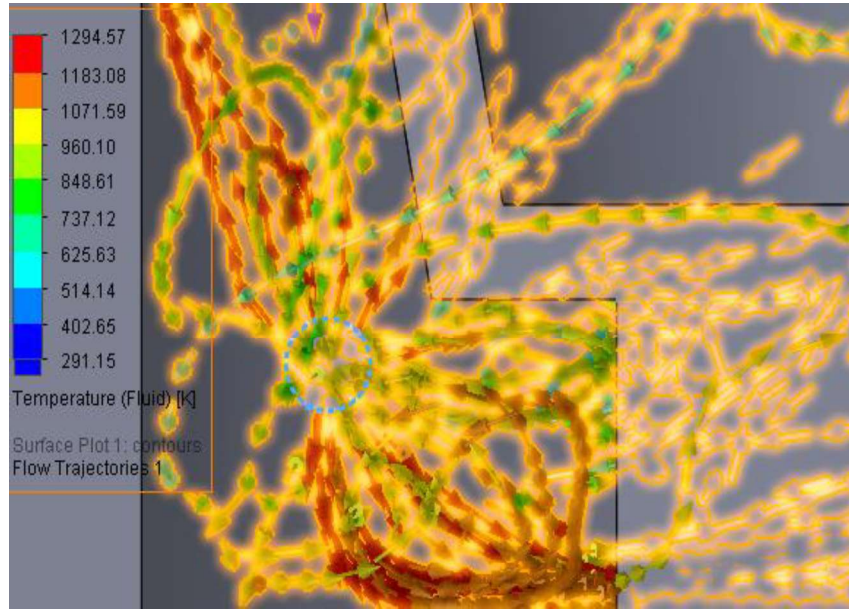


Figura 10- Borde de salida de combustible al interior del horno basculante.

De acuerdo con los parámetros termodinámicos preliminares se obtuvieron los siguientes resultados.

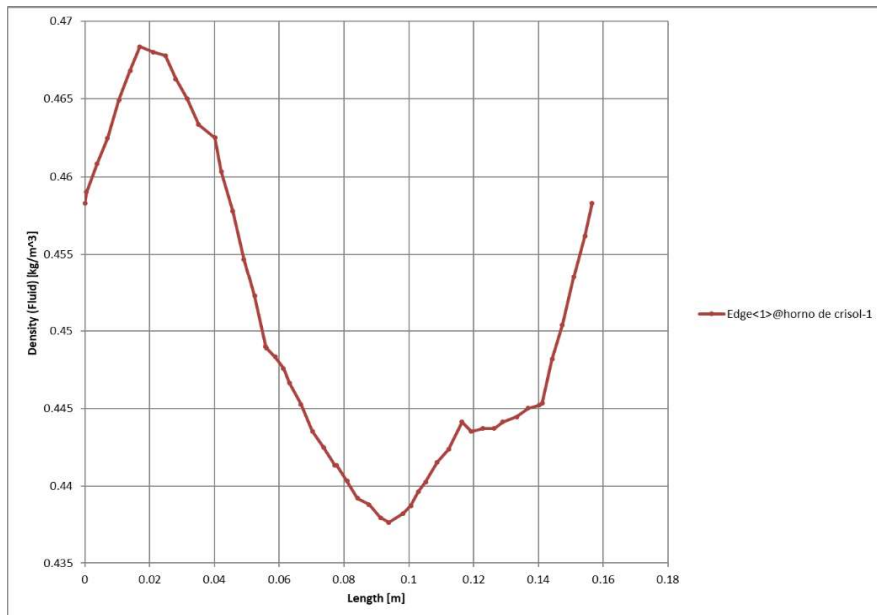


Figura 11- Densidad del fluido del borde de combustible aplicado al horno basculante.

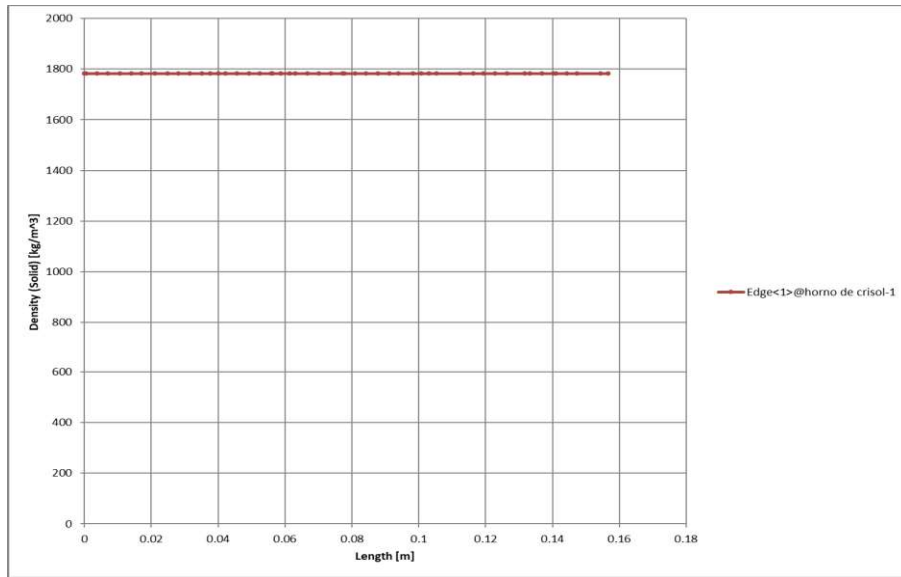


Figura 12- Densidad del solido de las paredes del horno basculante.

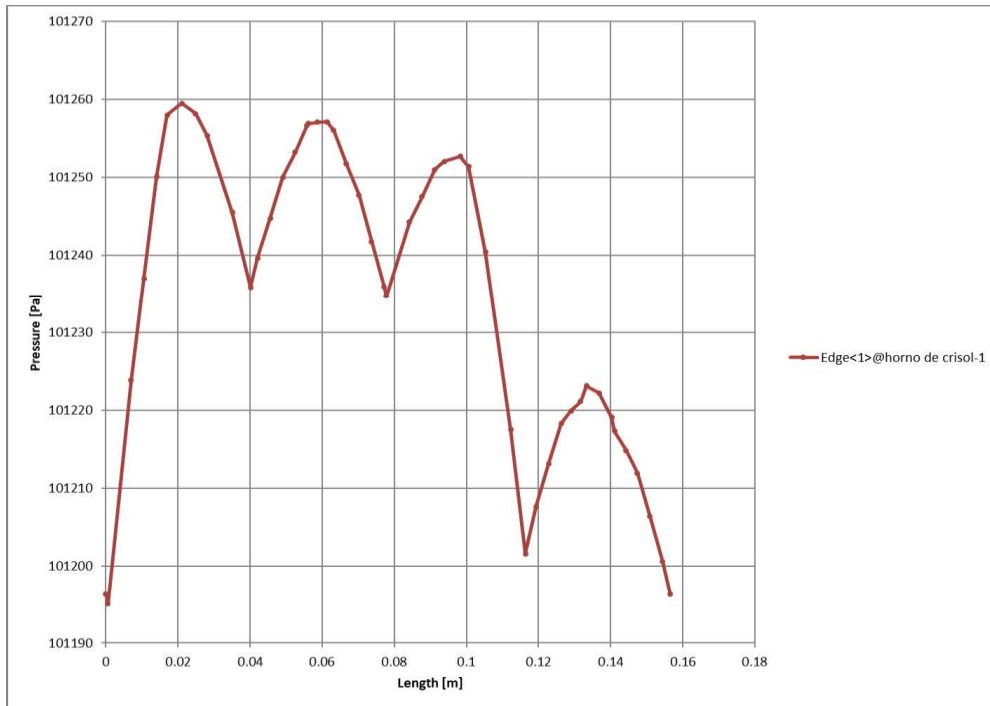


Figura 13- Presión dentro del horno basculante.

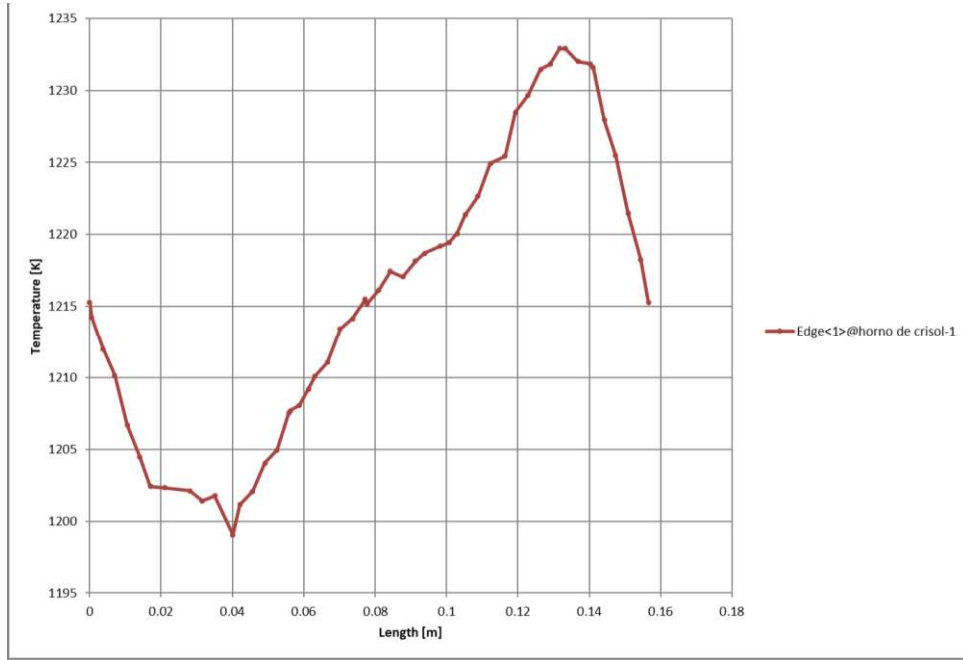


Figura 14- Temperatura dentro del horno basculante.

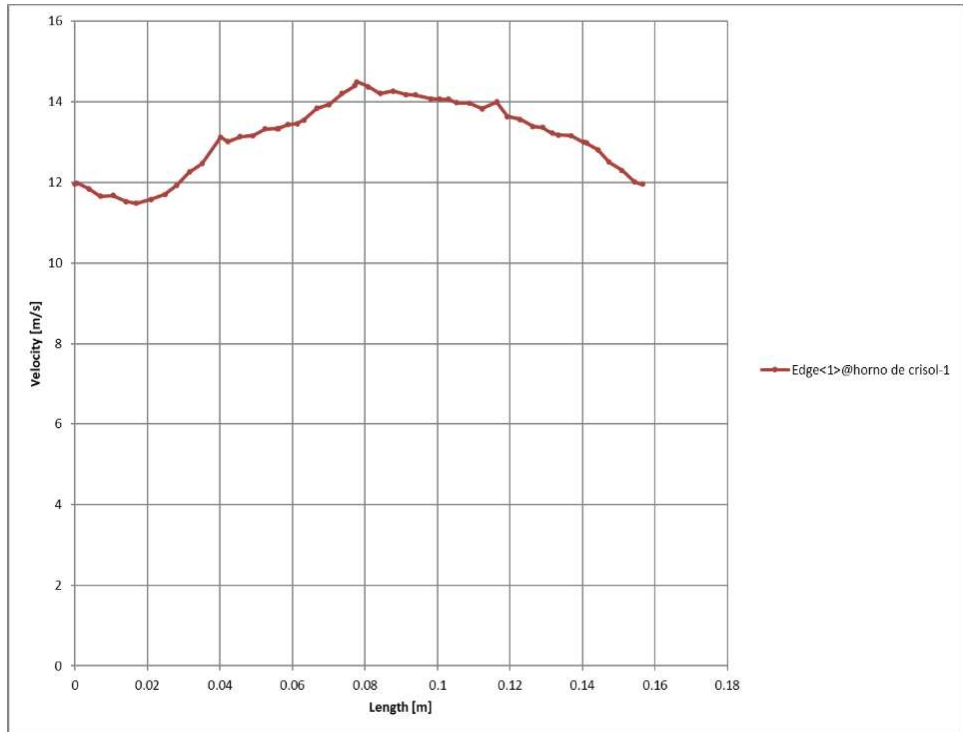
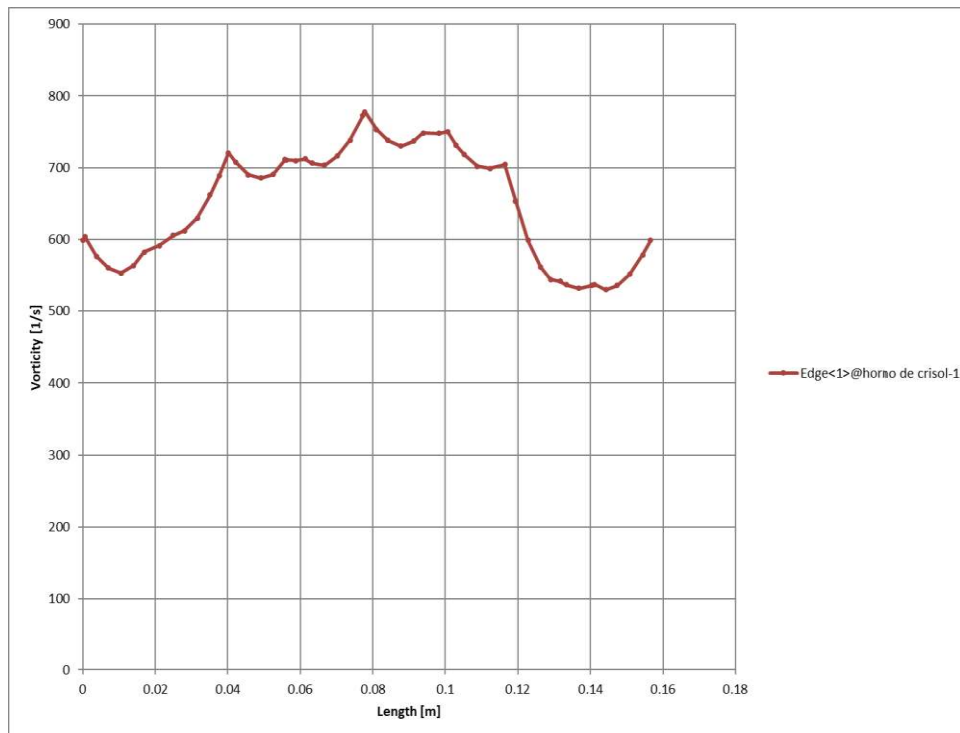


Figura 15- Velocidad en m/s dentro del horno basculante



**Figura 16-** Vorticidad (rotación del fluido) dentro del horno basculante.

### *Descripción de parámetros analíticos*

La densidad está definida como la masa por unidad de volumen, es decir:

$$\rho = \frac{v}{m} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

Para un elemento de volumen diferencial de masa  $\delta m$  y volumen  $\delta V$ , la densidad se puede expresar como:

$$\rho = \delta m / \delta V. \quad (2)$$

En general, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y la presión. La densidad de la mayoría de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura (Cengel & Boles, 2012).

La presión es una propiedad muy útil para describir el estado de un sistema y se define como la fuerza normal a una superficie real o ficticia, ejercida por unidad de área en el

sistema. Con frecuencia, en los trabajos de ingeniería, la presión se mide respecto a la presión atmosférica más que con referencia a un vacío absoluto (Howell & Buckius, 1990).

$$P_{\text{man}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \quad (3)$$

La presión es la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. Tiene como unidad los newtons por metro cuadrado ( $\text{N/m}^2$ ), también conocida como Pascal (Pa). Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío y se miden mediante medidores de vacío que indican la diferencia entre presión atmosférica y presión absoluta y se relacionan entre sí mediante:

$$P_{\text{manometrica}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \quad (4)$$

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}} \quad (5)$$

La temperatura es una de las propiedades más familiares, también es una de las propiedades más difíciles de definir exactamente (Bueche & Hetch, 2007). En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

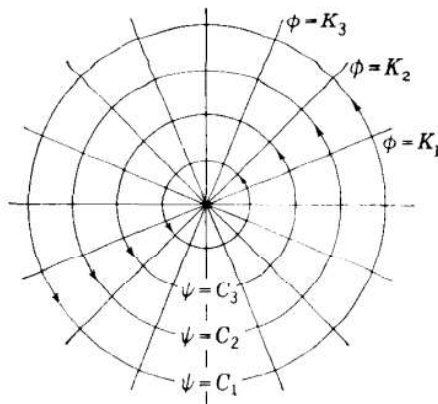
$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (6)$$

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

La velocidad es una cantidad vectorial que abarca la rapidez y la dirección del movimiento. Si un objeto experimenta un desplazamiento vectorial  $\vec{s}$  en un intervalo de tiempo  $t$ , en tal caso (Bueche & Hetch, 2007).

$$\text{Velocidad promedio} = \frac{\text{desplazamiento vectorial}}{\text{tiempo transcurrido}} \quad (8)$$

El vórtice simple es un flujo útil que puede establecerse con facilidad seleccionando la función de corriente de una fuente como el potencial de velocidad del vórtice.



**Figura 17-** Red de flujo para un vórtice (Shames, 1995).

La red de flujo será igual a la del análisis de la fuente y el sumidero, excepto que los círculos concéntricos serán las líneas de corriente y la familia de rectas radiales las líneas potenciales. El patrón de líneas de corriente indica que el fluido se mueve en trayectorias circulares alrededor del origen (Shames, 1995).

$$V_{\theta} = \frac{A}{2\pi r} \quad (9)$$

$$V_r = 0 \quad (10)$$

## CONCLUSIONES

La dinámica de fluidos de ingeniería (EFD) es una nueva variedad de software de dinámica de fluido computacional (CFD) que permite a los ingenieros mecánicos simular el funcionamiento de aplicaciones de transferencia de calor y flujo de fluidos con potentes herramientas en 3D intuitivas y fáciles de utilizar. La EFD se rige por criterios y objetivos de ingeniería que proporcionan a los ingenieros de producto la percepción técnica necesaria para responder a las cuestiones que surgen en el proceso de desarrollo del producto. SolidWorks Flow Simulation está basado en los mismos criterios matemáticos que el software de dinámica de fluido computacional (CFD) tradicional, aunque son las ventajas como el uso de geometría existente, gestión de la geometría compleja, mallado sencillo y dejando fuera las especulaciones y realización de geometrías adicionales. Esto quiere decir que agilizan y facilitan su uso y que no implican renunciar a una solución sólida y extraordinariamente precisa las que lo diferencian del resto. Utilizando la

simulación con software flow-simulation será posible estudiar las variables que intervienen en el diseño de los equipos con anticipación y prevenir posibles fallas. Así mismo predecir el comportamiento de los fluidos y del sistema analizando diferentes alternativas llegando a una óptima calidad en el proceso.

## REFERENCIAS

- Berrone, S., Pieraccini, S., & Scialo, S. (2017). Flow Simulation in Porous Media Immersed Intersecting Fractures. *Journal of Computational Physics*.
- Bueche, F. J., & Hetch, E. (2007). *Física General*. Univerty of Dayton: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. México, D. F: Mc Graw Hill.
- Groover, P. M., Barrientos, M. A., León, C., & Reyes, R. R. (2015). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México, D.F: Mc Graw Hill.
- Howell, J. R., & Buckius, R. O. (1990). *Principios de Termodinámica para Ingeniería*. Texas, E.U: Mc Graw Hill.
- Hu, G., & Kozlowski, T. (2018). Application of continuous Adjoint Method to Steady-state Two-phase Flow Simulations. E.U.: *Annal of Nuclear Energy*.
- Kearn, A. (1992). *Melting Furnace; Reverberation Furnaces and Crucible Furnaces*. Alabama, E.U: ASM Handbook International.
- Lo, D. C., Lee, C. P., & Lin, I. F. (2018). An Efficient Immersed Boundary Method for Fluis Flow Simulations whit Moving Boundaries. Taiwan, Kaohsiung: *Applied Mathematics and Computation*.
- Mobner, M., & Radespiel, R. (2017). *Flow Similations over Porous Media-Comparations whit Experiments*. Germany: *Computers \$ Fluids*.
- Pérez, C. S., Aguilera, C. Y., Hurtado, C. J., & Vargas, N. (2017). Modelación y Simulación Fluido-Dinámica Computacional de Sistema de enfriamiento de Gases para Fundición de Cobre mediante Convertidor Teniente con Enfriador Evaporativo. *Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingenireía*. Santiago, Chile, 179-187.
- Réveillac, J. M. (2015). *Computerized Flow Simulation. Optimization Tools for Logistics*. London, Kidlington : Oxford.
- Rodriguez, F. J., dardati, P. M., Godoy, L. A., & Celentano, D. J. (2015). Evaluación de Propedades Elásticas de la Funcidición Nodular Empleando Micromecánica Computacional. *Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingenireía*. Córdova, Argentina, 91-105.
- Shames, I. H. (1995). *Mecánica de Fluidos*. Mc Graw Hill.

- Y, O., & Akamatsu, T. (1991). *Viscous Flow Simulation Using the Discrete Vortex Model the Discussion Velocity Method*. Japan: Computers & Fluids.
- Yang, L., Remacha, M. J., & Jensen, K. F. (2017). *Simulations and Analysis of Multiphase Transport and Reaction in Segmented Flow Microreactors*. E.U: Chemical Engineering Science.
- Zhang, J., Liang, D., & Liu, H. (2018). *A Hybrid Hydrostatic and Non-hydrostatic Numerical Model For Shallow Flow Simulations*. Shangai, China: Estuarine, Coastal and Shell Science.