

## **1.- Título:**

“Optimización del tiempo de mezclado, el área de ojo expuesta y la agitación en un modelo físico de horno de olla con dos inyectores”

**1a.- Tutores responsables:** M. en I. Luis Enrique Jardón Pérez y Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

## **2.- Introducción:**

En el año 2016 la producción mundial de acero fue de 1, 603, 988 miles de toneladas, de las cuales 19, 002 fueron producidas en territorio mexicano (cerca de dos terceras partes de la capacidad de producción local), ocupando con esto el 13o lugar en producción mundial y siendo el segundo mayor productor de Norteamérica aportando un 17.12% de la producción de la región, solo por debajo de Estados Unidos [1, 2]. La demanda de acero en México se ha incrementado en un 161.6% del año 2007 al año 2018, llegando a ocupar el noveno lugar en la demanda anual de acero en el año 2018 con 27.6 millones de toneladas [2], cantidad muy superior a la producción local de acero. En México la industria siderurgia representa un 2.0% del PIB (6.9% del PIB industrial), generando aproximadamente 672 mil empleos de manera directa e indirecta. La producción de acero es además la industria que consume mayor cantidad de gas natural y ocupa el 3er lugar en consumo de energía eléctrica [1]. Con los datos mencionados nos damos cuenta de la enorme importancia que tiene la industria siderúrgica para el país.

Actualmente existen dos rutas principales para la producción de acero, la ruta integrada y la no integrada, en la primera se parte de mineral con valores ferrosos que se procesa en altos hornos o en hornos de reducción directa, obteniendo de esta manera hierro primario que puede ser arrabio (procesado en los Altos Hornos) o hierro esponja (procesado en reactores de Reducción Directa), posteriormente este hierro primario, si se trata de hierro esponja, pasa a un proceso de aceración en hornos de arco eléctrico (EAF) o bien, si se trata de arrabio, se acera en hornos básicos de oxígeno (BOF) para obtener acero. En el caso de la ruta no integrada se parte directamente de chatarra de acero que se funde en hornos de arco eléctrico. A pesar de que en ambas rutas se obtiene acero líquido, en este punto la calidad del mismo es deficiente, por lo que no es posible pasar al proceso de colada continua si se desea cumplir con los requerimientos actuales de calidad, por lo que en su lugar, se realiza a un proceso de refinación secundaria [3].

De los procesos de refinación secundaria el más frecuentemente utilizado es el horno de olla [3], ya que cumple con todos los objetivos principales de la refinación secundaria del acero, y su uso es tan extendido que muchas veces se denomina como metalurgia de la olla a la refinación secundaria. El horno de olla es un reactor en el que interactúan muchas fases, el acero líquido que se desea procesar, una capa de escoria superficial (óxidos fundidos), un gas inerte (típicamente argón) que se inyecta desde el fondo del reactor, y las inclusiones no metálicas que tiene el acero fundido. Sin embargo, desde una perspectiva de agitación del baño o de flujo de fluidos, son tres fases las que son importantes (acero, escoria y burbujas de gas). La capa de escoria sirve para proteger al acero de la oxidación al aislar el mismo del medio ambiente, además de que hay intercambio de especies químicas entre las fases acero – escoria lo que permite la desulfuración y atrapa las inclusiones del acero permitiendo su remoción. El gas por otra parte tiene la principal función de incrementar la agitación dentro del reactor, con lo cual los fenómenos de transporte se ven acelerados dentro del mismo, y por ende acelerando todas las operaciones metalúrgicas practicadas en la olla y aumentando la productividad de la planta.

Ante la creciente demanda de acero (no solo en cantidad, sino en calidad), en los últimos años se ha incrementado el interés industrial y académico en la metalurgia de la olla, buscando comprender la dinámica de fluidos, así como los fenómenos de transporte de especies químicas y de energía que ocurren dentro del reactor, esto con el fin de incrementar la calidad final del acero, optimizar el consumo de insumos y disminuir los tiempos de procesamiento para cumplir con las exigencias del consumidor actual.

Existen varios trabajos de investigación donde se realiza optimización de horno olla, en los cuales se busca encontrar el valor óptimo de diferentes variables para obtener un mejor funcionamiento del reactor, el cual se ve reflejado en distintas variables respuesta, por ejemplo tiempo de mezclado o área de ojo expuesta, siendo el primero el tiempo requerido para uniformizar al 95% en toda la olla un soluto inyectado en un pulso en un punto del reactor, y el segundo el área expuesta de metal líquido causada por el desplazamiento de la escoria debido al paso de burbujas de gas que salen a la atmósfera a través de las superficie libre. Geng et al [4] (2010) evalúan mediante modelado matemático el efecto de la posición angular y radial de dos tapones porosos y del flujo de inyección sobre el tiempo de mezclado en la olla, buscando encontrar el valor óptimo de las tres variables estudiadas, sin embargo, no realizan un procedimiento matemático formal de optimización. Singh et al [5] en el año 2010 realizan también una optimización mediante modelo matemático de una olla con dos tapones porosos, en este caso evaluando el flujo de gas y dos arreglos de los tapones porosos (que denominan adyacente y diagonal), nuevamente en este trabajo no se utiliza un algoritmo de optimización.

Cloete et al [6] en el año 2013 presentan una optimización basada en diseño de experimentos, donde se evalúan variables de diseño de la olla mediante modelado matemático, en este caso las variables estudiadas son la capacidad de la olla, la relación de aspecto y el ángulo de expansión, mientras que la optimización se realiza sobre la energía cinética total del sistema y el tiempo de mezclado del mismo, en el trabajo realizan un análisis estadístico profundo del efecto de las variables estudiadas sobre las variables respuesta pero no presentan una rutina formal de optimización para obtener el óptimo del sistema.

Un trabajo más reciente de optimización es presentado por Mazumdar et al [7] (2017), en este caso se basa en correlaciones previamente reportadas de área de ojo [8] y tiempo de mezclado [9], estas correlaciones se someten a un proceso de optimización mediante un algoritmo genético multi-objetivo, buscando de esta manera obtener el punto óptimo del proceso, sin embargo por la naturaleza del proceso no se obtiene un único óptimo, sino que se obtiene una serie de puntos que conforman un frente de Pareto. Jardón et al [10] (2018) realizan mediante modelado físico un proceso de optimización en el que se evalúa el efecto de la posición radial de tapones, el número de tapones, la presencia o ausencia de una fase líquida superior (escoria) y el flujo de gas, para la experimentación se utiliza un diseño de experimentos  $2^k$  y se realiza un análisis estadístico de los resultados sobre la velocidad promedio, la energía cinética turbulenta promedio y la apertura del ojo de escoria, mismas variables sobre las que se realiza una optimización mediante un algoritmo genético multi-objetivo adicionando además el tiempo de mezclado obtenido mediante una correlación publicada en un trabajo previo [11].

### 3.- Hipótesis:

El proceso de refinación secundaria del acero mediante ollas requiere de una capacidad de mezclado alta para ayudar a los fenómenos de transporte que intervienen en el proceso, pero a su vez necesita que el metal se vea protegido por la escoria por lo que el área expuesta del mismo a la atmósfera debe ser la menor posible, lo cual impide que el mezclado por inyección de gas se pueda incrementar ad infinitum. Entonces la hipótesis es:

En este sentido se estima que al aumentar el flujo de gas, acercar la posición angular de los tapones, aplicar la asimetría en los flujos inyectados de gas y el disminuir el espesor de escoria mejorará la agitación en el horno olla con dos toberas, disminuyendo el tiempo de mezclado pero aumentando al mismo tiempo el área de ojo expuesta y entonces habrán diversas opciones de operación para realizar una optimización del proceso que sea un compromiso razonable entre un baño bien agitado sin tanta área expuesta a través del ojo.

### 4.- Objetivo(s):

- Obtener ecuaciones que describan la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta promedio en un horno olla en función del flujo de gas, la simetría de dos flujos, la posición angular de las toberas y el espesor de la capa de escoria, mediante modelado físico de una olla de aceración con dos toberas y un diseño factorial  $2^k$ .

- Mediante la optimización con el algoritmo genético multi-objetivo NSGA-II, se van a obtener las condiciones óptimas de operación para una olla de aceración con dos tapones considerando el efecto del flujo de gas, la simetría de dos flujos, la posición angular de las toberas y el espesor de la capa de escoria, sobre el tiempo de mezclado, el área de ojo expuesta, la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta promedio.

## 5.- Metas:

- Utilizando un diseño factorial  $2^k$  y modelado físico, evaluar el efecto de las variables flujo de gas, posición angular de las toberas, simetría del flujo de gas y espesor de escoria sobre la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta promedio en un horno olla, mediante modelado físico y la técnica PIV.

- Realizar un proceso de optimización formal, sobre el tiempo de mezclado, el área de ojo expuesta, la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta, para obtener condiciones óptimas de operación en una olla de aceración.

- Escritura de un reporte final (80% de la tesis de licenciatura).

## 6.- Metodología:

El estudiante realizará las siguientes actividades para cumplir con los objetivos y metas del proyecto:

- Revisión de la literatura, enfocándose en artículos de optimización en ollas de aceración.

- Capacitación en el uso del equipo PIV, incluyendo las bases teóricas y la operación del equipo.

- Diseño de una matriz experimental  $2^k$ , eligiendo los niveles y experimentos necesarios para evaluar las variables descritas en los objetivos del trabajo. Esta selección se basará en la revisión de la literatura previamente descrita y en conjunto con los tutores.

- Experimentación, realizar los experimentos planteados en la matriz experimental, en estos experimentos se obtendrán la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta promedio mediante modelado físico y la técnica PIV. Para realizar los experimentos se prepara previamente el modelo físico (para poder realizar mediciones de las técnicas ópticas) y se calculara el escalamiento mediante los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

- Procesamiento de resultados, se obtendrán ecuaciones de regresión para el tiempo de mezclado, el área de ojo expuesta, la velocidad promedio y la energía cinética turbulenta, evaluando flujo de gas, posición angular de las toberas, simetría del flujo de gas y espesor de escoria, sobre las cuales se realizará una rutina formal de optimización para obtener ya sea un único punto óptimo o un conjunto de puntos en un frente de Pareto.

- Análisis de resultados, al obtener resultados de la experimentación se analizarán en conjunto de los tutores con el fin de evaluar el efecto de las variables exploradas, tanto cualitativamente como cuantitativamente, enfocándose sobre todo en el efecto sobre la fluidinámica del sistema.

- Escritura del reporte, se escribirá el reporte a lo largo de las 16 semanas del semestre con el objetivo último de tener una base suficiente para la escritura de la tesis de licenciatura.

## 7.- Infraestructura:

El grupo de trabajo cuenta con equipos de cómputo e impresoras suficientes. Además de dos modelos físicos de horno de olla escalados 1/6 y 1/17, así como el equipo necesario para implementar la técnica PLIF y realizar mediciones de apertura de ojo en escoria mediante análisis de imágenes.

## 8.- Cronograma de actividades:

En el siguiente cronograma se presentan de forma resumida las actividades a realizar y los tiempos estimados para las mismas.

No.	Actividad	Semana															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Revisión de la literatura	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x
2	Capacitación en el uso del equipo PIV			x	x	x											
3	Diseño de una matriz experimental					x	x										
4	Experimentación						x	x	x	x			x	x			
5	Procesamiento de resultados								x	x	x		x	x	x		
6	Análisis de resultados											x	x	x	x	x	
7	Escritura del reporte				x				x				x			x	x

## 9.- Cometarios adicionales:

Este trabajo se enmarca en el proyecto de doctorado del alumno M. en I. Luis Enrique Jardón Pérez.

## 10.- Referencias:

- 1.- CANACERO. Acero en cifras. 2017 [citado 22/05/2018]; dirección web: <http://www.canacero.org.mx>.
- 2.- Worldsteel association. About steel. 2018 [citado 22/05/2018]; dirección web: <https://www.worldsteel.org>.
- 3.- Ghosh, A., Secondary steelmaking: principles and applications. 2000: CRC Press.
- 4.- Geng, D.-q., H. Lei, and J.-c. He, Optimization of mixing time in a ladle with dual plugs. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2010. 17(6): p. 709-714.
- 5.- Singh, R.K., et al., Improvement in LF process through optimization of dual porous plugs location in gas stirred ladles. Materials and Manufacturing Processes, 2010. 25(1-3): p. 92-98.
- 6.- Cloete, S.W.P., J.J. Eksteen, and S.M. Bradshaw, A numerical modelling investigation into design variables influencing mixing efficiency in full scale gas stirred ladles. Minerals Engineering, 2013. 46: p. 16-24.
- 7.- Mazumdar, D., P. Dhandapani, and R. Sarvanakumar, Modeling and optimisation of gas stirred ladle systems. ISIJ International, 2017. 57(2): p. 286-295.
- 8.- Peranandhanthan, M. and D. Mazumdar, Modeling of slag eye area in argon stirred ladles. ISIJ international, 2010. 50(11): p. 1622-1631.
- 9.- Patil, S.P., et al., Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles. ISIJ International, 2010. 50(8): p. 1117-1124.
- 10.- Jardón Pérez, L.E., et al., Optimizing gas stirred ladles by physical modeling and PIV measurements. Materials and Manufacturing Processes, 2018. 33(8): p. 882-890.
- 11.- Amaro Villeda, A.M., M.A. Ramirez Argaez, and A.N. Conejo, Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling. ISIJ international, 2014. 54(1): p. 1-8.