



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

---

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

**Estudio experimental de mezclado en ollas agitadas  
con gas asistido por modelación física.**

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

**PRESENTA**

**MIGUEL ÁNGEL MORUA RAMÍREZ**

**TUTOR**

**DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2010**



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:** Profesor: Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

**VOCAL:** Profesor: Arturo Alejandro Sánchez Santiago

**SECRETARIO:** Profesor: Marco Aurelio Ramírez Argáez

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Juan Solórzano López

**2° SUPLENTE:** Profesor: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:** \_\_\_\_\_  
Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

**SUPERVISOR TÉCNICO:** \_\_\_\_\_  
M EN I. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

**SUSTENTANTE:** \_\_\_\_\_  
Miguel Ángel Morua Ramírez

**AGRADEZCO AL PROGRAMA PAPIIT IN118105-2 CON TITULO MODELACIÓN FÍSICA Y MATEMÁTICA DE LA SEPARACIÓN DE INCLUSIONES NO METÁLICAS DEL ACERO POR MEDIO DE BURBUJEO EN LA OLLA, DIRIGIDO POR EL DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ, POR EL APOYO RECIBIDO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.**

**"[LA CIENCIA] TIENE DOS REGLAS.**

**PRIMERO: NO HAY VERDADES SAGRADAS; TODA PRESUNCIÓN TIENE QUE SER EXAMINADA CRÍTICAMENTE; LOS ARGUMENTOS DE AUTORIDADES NO VALEN NADA.**

**SEGUNDO: CUALQUIER INCONSISTENCIA CON LOS HECHOS TIENE QUE DESCARTARSE O REVISARSE. NOSOTROS TENEMOS QUE COMPRENDER EL COSMOS COMO ES Y NO CONFUNDIR CON LO QUE QUISIÉRAMOS QUE FUERA".**

(CARL SAGAN)

**"ALICIA SE RIÓ Y DIJO: NO TIENE SENTIDO INTENTARLO, NO SE PUEDE CREER EN COSAS IMPOSIBLES.**

**LA REINA DIJO: YO, MÁS BIEN DIRÍA QUE ES CUESTIÓN DE PRÁCTICA. CUANDO ERA JOVEN, PRACTICABA TODOS LOS DÍAS DURANTE MEDIA HORA. MUCHAS VECES LLEGUE A CREER EN SEIS COSAS IMPOSIBLES ANTES DEL DESAYUNO".**

(LEWIS CARROLL, ALICIA EN EL PAÍS DE LAS MARAVILLAS)

**DEDICATORIAS:**

**A MIS ASESORES: ADRIAN AMARO VILLEDA Y MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ, POR SU DISPOSICIÓN Y GRANDÍSIMA AYUDA ANTE TODO EL DESARROLLO DE ESTA TESIS. ADEMÁS DE SER ENORMES EJEMPLOS DEL PROFESIONISTA QUE SE DEBE SER. LOS ADMIRO Y RESPETO.**

**A TODOS LOS PROFESORES DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERA METALÚRGICA: POR SU DEDICACIÓN Y AMOR A LA CARRERA.**

**A MI MADRE: TU AMPLIA SABIDURÍA PERMITIÓ TENER ESTE FRUTO, GRACIAS POR LA VIDA.**

**A MIS HERMANOS: SUSANA, JUAN, PATRICIA, RICARDO Y ERNESTO, POR ENSEÑARME QUE TODO ES POSIBLE CON DISPOSICIÓN Y ENTEREZA.**

**A MI TÍA LUISA Y PRIMA LUISA: ENTERAMENTE AGRADECIDO POR SU AYUDA Y AMOR.**

**A MI NOVIA: BETY TU ERES LA INSPIRACIÓN DEL PRESENTE Y EL FUTURO.**

**A MIS GRANDES AMIGOS: ANABELL (LUCHA POR GRANDES OBJETIVOS), VIRIDIANA (A VECES SOLO HACE FALTA ESTAR ALLÍ, Y NUNCA PERDER EL RUMBO), SALVADOR (TE ADMIRO Y NOS VEMOS EN EL ÉXITO), EDNA (TE MERECEES TODO LO QUE TE PROPONGAS), ARTURO (LO PRIMERO ES SENTIRSE GRANDE, LO SEGUNDO ES ACEPTARLO COMO CONCEPTO FRONTERA), JERICÓ (CADA PASO QUE DAS ES UN GRAN PASO), LUZ ELENA (TODO LO QUE SE VE NO SIEMPRE ES ORO, PERO PUEDE TRANSFORMARSE EN TAL), JOSÉ LUIS (LA AMISTAD HABITA DONDE MENOS LO ESPERAS), HIRAM (LOS HECHOS SON MÁS DENSOS QUE TODAS LAS PALABRAS JUNTAS), BENJAMÍN (LA NOBLEZA ES UN ELOGIO DIGNO), VÍCTOR PÉREZ (LA TENACIDAD ES UN CONCEPTO QUE ES APLICABLE EN TI), ITZEL (EL POTENCIAL ES UNA ENERGÍA QUE CUANDO SE DEJA LIBRE ES MARAVILLOSA), CLAUDIA (EL SER ASERTIVO ES SER MÁS GRANDE QUE MIL TERCOS), ABRIL PÉREZ (CALIDEZ, HONOR Y CONOCIMIENTO), NAYETZIN (EL FUTURO NOS ALCANZA TAN RÁPIDO, “QUE MIRA YA LLEGO”), EVA (EL DESTINO ESTÁ EN ALGÚN LUGAR, YA LLEGARÁ), CRISTIAN (LA OSCURIDAD ES SOLO UNA PERSPECTIVA), CLARA (EL LIDERAZGO SE DESARROLLA A VECES MUY RÁPIDO EN PERSONAS COMO TÚ), PATSY (UN ESFUERZO APLICADO ENDURECERÁ), ANELL (LA GENIALIDAD SE CARACTERIZA POR ADMIRABLE, EXTRAÑA Y EXTRAORDINARIA), MEMO (NO SOLO LOS DIAMANTES BRILLAN, EL TALENTO TAMBIÉN).**

**A SIQMA: CUANDO TE CONOCÍ ERAS UN FANTASMA QUE SE MATERIALIZABA, TE VI CRECER Y FORJARTE EN LAS BRAZAS, HOY SE TE PRONOSTICA UN FUTURO BRILLANTE, A TODOS LOS QUE LLEGUEN A ESTA ORGANIZACIÓN NO OLVIDEN SU CARÁCTER DE “SOCIEDAD”.**

**A MI ALMA MATER Y ESTE HERMOSO PAÍS: SIEMPRE ORGULLOSO Y AGRADECIDO POR ESTAR EN TUS FILAS.**

# ÍNDICE

	<b>Pagina</b>
<b>Capitulo 1 INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Desarrollo histórico.....	9
1.2 Refinación secundaria de acero.....	11
1.3 Modelado físico.....	14
1.4 Aspecto económico.....	15
<b>Capitulo 2. Revisión bibliográfica</b>	
2.1 Revisión bibliográfica.....	16
2.2 Fenomenología del proceso.....	25
<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>27</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
<b>Capitulo 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	
3.1 Instalación del modelo físico.....	28
3.2 Pruebas preliminares.....	33
3.3 Condiciones de operación.....	34
3.4 Diseño experimental.....	36

3.5	Protocolo de experimentación .....	39
3.5.1	Montaje y desmontaje.....	39
3.5.2	Proceso experimental.....	43
3.5.3	Tratamiento de datos.....	44
<b>Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	Ejemplo de la determinación de tiempo de mezclado.....	45
4.2	Influencia del flujo de gas y de la posición de inyección.....	47
4.2.1	Un tapón abierto .....	47
4.2.2	Dos tapones abiertos a 180° uno del otro.....	53
4.2.3	Tres tapones abiertos a 120° uno de otro.....	58
4.3	Influencia del flujo de gas y la cantidad de tapones abiertos.....	61
<b>Conclusiones.....</b>		<b>64</b>
<b>Índice de figuras.....</b>		<b>66</b>
<b>Índice de tablas.....</b>		<b>69</b>
<b>Abreviaturas y subíndices.....</b>		<b>70</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>71</b>
<b>Apéndice .....</b>		<b>74</b>

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

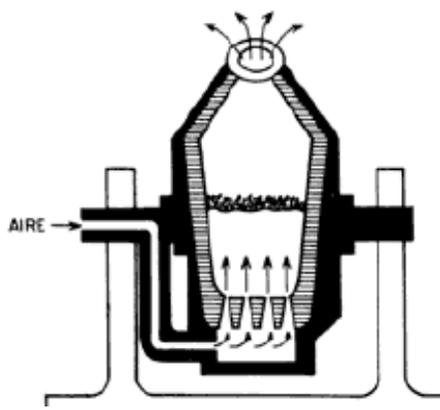
## 1.1 DESARROLLO HISTÓRICO

La fabricación y procesado de acero se ha realizado desde la edad de hierro, siendo en ese entonces producto exclusivo para uso ornamental. A causa de la escases de estaño y cobre surgió la necesidad de materiales para uso herramental (ver Figura 1); sin embargo, el acero fue fabricado en cantidades masivas hasta el desarrollo del proceso con el convertidor Besemmer (1856) cuyo esquema se presenta en la Figura 2.



**Figura 1.** Antigua fabricación de acero<sup>27</sup>.

El proceso Besemmer (ver Figura 2) basado en la inyección de aire por la base del horno presentaba dificultades en homogeneizar la composición química y procesar arrabios con alta cantidad de carbono y azufre, por lo que el acero producido era frágil. Las modificaciones de este proceso y la generación de otros han permitido mejorar la calidad del acero.



**Figura 2.** Esquema general de proceso Bessemer<sup>27</sup>.

En la actualidad se tienen dos rutas para la obtención de acero:

- A) Ruta Integrada

Se parte de la extracción y refinación del mineral de hierro que junto con algunos aditivos y coque se cargan al Alto Horno que produce la reducción del mineral y transforma a metal líquido con alto contenido de carbono llamado arrabio. El arrabio se transporta mediante carros torpedo que llegan a la acería donde se obtiene acero con un convertidor al oxígeno BOF. Este acero se refina y se ajusta la composición en la Olla y se cuela en la máquina de colada continua. Los productos de la colada continua se laminan en productos semiterminados como lámina, alambrón, varilla, etc.

Una alternativa de la ruta integrada es reducir el mineral de hierro con gas hidrógeno o CO mediante algún proceso de reducción directa que produce hierro esponja. Este hierro esponja se funde en hornos eléctricos de arco y una vez obtenido el acero se refina en la olla, se cuela en la máquina de colada continua y se lamina para obtener los productos semiterminados ya referidos.

- B) Ruta no integrada

Se inicia con el reciclaje de chatarra de acero que se funde en el Horno de arco eléctrico y una vez fundido el acero se realiza la refinación secundaria en la olla y la solidificación en la máquina de colada continua para terminar con la laminación que genera los productos semiterminados.

## **1.2 REFINACIÓN SECUNDARIA DE ACERO**

Cualquiera que sea la ruta elegida para fabricar acero en la actualidad, se requiere de su refinación secundaria en la Olla. Se entiende por refinación secundaria a homogeneizar la composición química del acero, alearlo para cumplir con el grado especificado, uniformizar la temperatura del acero, eliminar oxígeno y azufre; así como la eliminación y/o modificación de las inclusiones no metálicas. Estas operaciones ayudarán a que la calidad del acero fabricado (propiedades físicas y mecánicas) sea la adecuada. La mayor parte de las operaciones ya mencionadas en la refinación secundaria requieren de una buena agitación para acelerarlas y la forma de lograr dicha agitación es con inyección de gases, así como usar aditivos (desoxidantes, desulfurantes, escorificantes y elementos aleantes). Sin olvidar que la inyección de gas argón por el fondo a través de tapones porosos es necesaria para lograr la agitación requerida y pertinente debido a la alta temperatura de trabajo. El mecanismo de agitación es dado por las fuerzas de arrastre o fricción que se ocasionan al ascender las burbujas a través del líquido, causado esto por diferencia de densidad o fuerzas boyantes.

Los procesos principales de inyección de gas para refinación secundaria son:

- Proceso con horno de Argón- Oxígeno para desulfurado (AOD), en el cual la inyección es de costado como se aprecia en el esquema de la Figura 3.

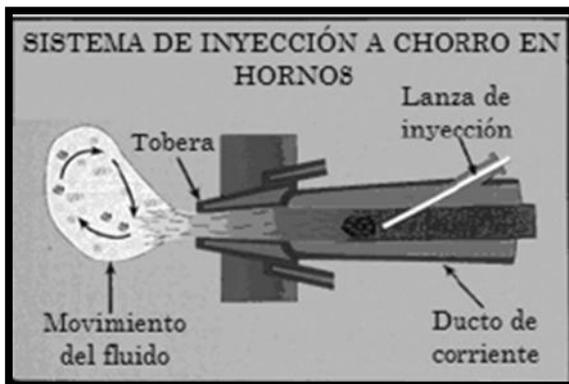
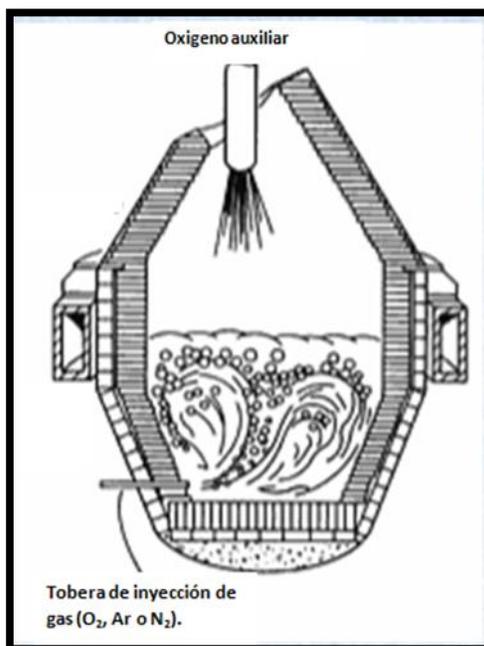
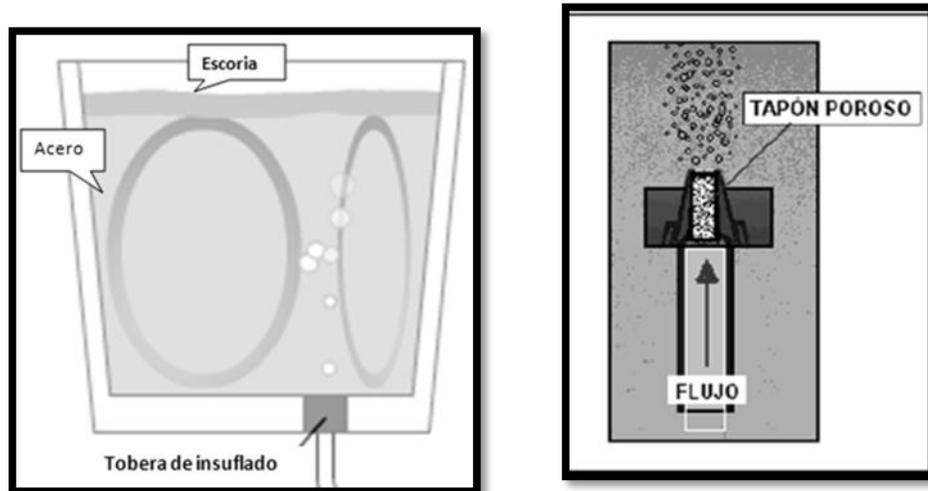


Figura 3. Esquema del proceso AOD (izquierda). Esquema de insuflado de gas vía lateral (derecha) <sup>28</sup>.

- Proceso de inyección de argón por la base del horno olla (HO), concerniente al presente trabajo de tesis mostrado en el esquema de la Figura 4.



**Figura 4.** Esquema del proceso HO (izquierda), insuflado de gas por la parte inferior (derecha) <sup>28</sup>.

Las ventajas que presenta la agitación mediante el insuflado de gases son:

- Desulfuración.
- Descarburizado.
- Desoxidación.
- Eliminación de inclusiones.
- Adición de elementos aleantes.
- Mezclado térmico y
- Mezclado químico.

Con esta refinación secundaria se alcanza en los aceros un mayor control químico, así como homogeneidad de propiedades físicas y por ende una alta calidad del producto.

### 1.3 MODELADO FÍSICO

Debido a las características de la operación del Horno Olla (temperaturas próximas a 1600° C), la opacidad de los metales y escorias fundidas, resulta difícil o imposible medir los parámetros que definen al proceso (tiempo de mezclado, perfiles de velocidad del fluido, etc.), por ello se recurre a la modelación física y/o matemática del proceso, sirviendo como herramienta que hace posible entender y predecir los fenómenos de fluidos y de transporte másico.

Cabe aclarar que los modelos físicos son representaciones de procesos a través de otros materiales, escalados rigurosamente con criterios de similitud en geometría, dinámica y cinemática de los fenómenos de flujo de fluidos que ocurren en el proceso real. Estos modelos utilizan diferentes materiales, para favorecer la medición y observación; además de disminuir los riesgos de trabajo.

Y sobre todo el modelo físico es una de las herramientas de la ingeniería de procesos para entender, controlar y optimizar los dichos procesos. Además, el ingeniero de procesos cuenta con otras herramientas además del modelo físico, tales como la modelación matemática, plantas pilotos, mediciones en planta y laboratorio.

En la refinación secundaria se cuenta con diversos estudios en modelado físico (se detallaran en la revisión bibliográfica), que desde los años 1980's han aportado a la mejora operativa; sin embargo, aun no se han abarcado muchos fenómenos los cuales no se han comprendido del todo.

## **1.4 ASPECTO ECONÓMICO**

El impacto económico repercute significativamente en el mercado siderúrgico en los Estados Unidos Mexicanos, siendo el 2% del producto interno bruto nacional y generando 150 000 empleos directos y 500 000 indirectos, es de los más grandes consumidores de minerales, electricidad, gas natural y usuario de ferrocarril <sup>1</sup>.

Además, ante la concientización del efecto de la industria en el medio ambiente, se busca la minimización de emisiones de gases invernadero y del uso de todos los materiales subproductos del acero como las escorias. Para tales fines se busca el uso de parámetros de operación que conlleven a disminuir las pérdidas de energía sin perder las metas de producción.

Este control de parámetros operativos, también conlleva a la producción de “acero limpio”, es decir, con alto control de composición química con el mínimo de contenido de elementos residuales e inclusiones. Las operaciones de refinación secundaria cumplen estas necesidades, como se vio en las ventajas del proceso, permitiendo la fabricación de aceros limpios. Mediante los estudios de control se permite optimizar el proceso, reduciendo la energía y productos usados.

## Capítulo 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Las líneas de investigación de la refinación secundaria en HO se categorizan, según el tipo de análisis, en tres grupos principales <sup>2</sup>.

A - Modelación física

B - Modelación matemática.

C - Combinación de modelos físicos y matemáticos.

Los parámetros operativos evaluados son: flujo de gas, cantidad de líquido, dimensionalidad de la olla, cantidad de tapones y posición de tapones, además de los parámetros estudiados son: los patrones de flujo, la estructura turbulenta, el mezclado y los intercambios de masa entre las fases.

A - Modelación física del horno olla.

Como se mencionó anteriormente, este es un instrumento del ingeniero de procesos basado en el escalamiento físico, dinámico y cinemático de un proceso. En este caso particular se tienen numerosos fenómenos físicos que ocurren en el HO.

Los fenómenos principales para analizar son: Características del sistema gas-liquido (estructura de la pluma\*, cantidad, velocidad y estabilidad de la burbujas <sup>3, 4, 5,6</sup>), perfiles de velocidad en el fluido <sup>7, 8</sup>, transporte másico <sup>9</sup>, mezclado térmico y químico <sup>10,11</sup>. Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados se han enfocado a la medición de velocidades en el líquido y la forma de la pluma <sup>2</sup>, dejando una amplia gama de temas que aún requieren de investigación científica.

Para hacer funcional el modelo físico se realiza escalamiento de los materiales, mediante las propiedades que describan los fenómenos del proceso. Para el caso del acero refinado con argón se utiliza agua y aire, lo cual es explicado con la propiedad de la viscosidad cinemática del fluido (Ecuación 1):

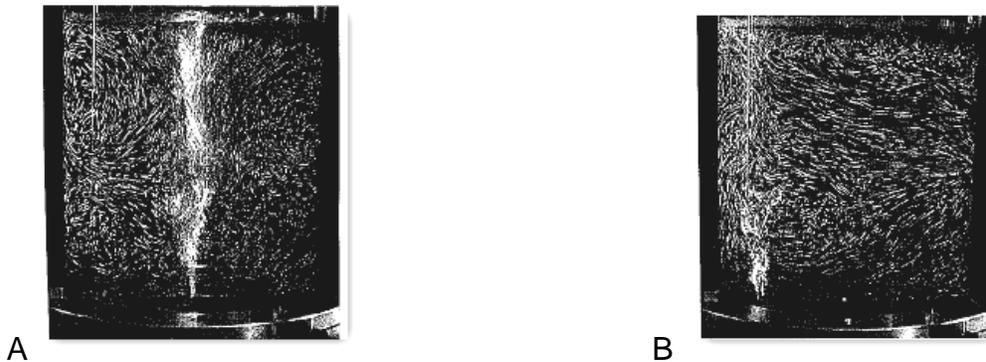
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1).$$

En la Tabla 1 se muestran los datos que comprueban la similitud en viscosidad cinemática ( $\nu$ ) entre el acero a 1600 °C y el agua a temperatura ambiente, la cual se refiere al comportamiento del liquido mientras fluye <sup>12</sup>.

**Tabla 1.-** Datos de densidad, viscosidad estática y cinemática reportados.

	Densidad ( $\rho$ , Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad estática ( $\eta$ , N s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática ( $\nu$ , m <sup>2</sup> /s)
Agua 20° C	998.2 (ref. 31)	0.0010 (ref. 31)	1x10 <sup>-6</sup>
Acero 1600° C	7000 (ref.29)	0.0068 (ref. 30)	0.97x10 <sup>-6</sup>

La inyección de gas céntrica (Figura 5A) ha sido la más estudiada, sin embargo la forma de inyección del gas más usada por las empresas acereras y menos investigada es la excéntrica <sup>13,14</sup> (Figura 5B).



**Figura 5.** A) Imagen de inyección céntrica en un modelo físico y B) Imagen de inyección excéntrica del mismo modelo físico (referencia 13).

El número de tapones abiertos es otro efecto no muy estudiado, sin embargo, es de amplio uso en las industrias <sup>14, 15</sup>.

La eficiencia de muchos procesos químicos es relacionada con el fenómeno de mezclado. Esto debido a que tienen como objetivo la homogeneización química o térmica. La evaluación de este fenómeno recurre a la medición del tiempo de mezclado, que según la convención usada es delimitada entre el 95-99% de homogeneización, es decir, el tiempo de mezclado se define como el tiempo requerido para que un soluto inyectado en un punto del reactor alcance entre el 95-99% de uniformidad en todo el sistema.

El mezclado es en esencia un fenómeno de convección más difusión molecular y turbulenta, donde de acuerdo a los perfiles de flujo y a la estructura turbulenta del sistema en particular, alguno de estos mecanismos de transporte gobierna el mezclado en mayor medida. Es de considerar un efecto mayoritario en la convección dado los regímenes turbulentos que prevalecen en el baño metálico.

Para el HO, se provoca el mezclado con la inyección de argón en la base de la olla.

Joo y Guthrie <sup>16</sup>, describen al mezclado como un mecanismo en función de la posición del tapón, punto de adición de trazador y localización del aparato de medición. De acuerdo con esto el mezclado en HO es controlado por dos situaciones en el seno del líquido (convección) y en remolinos (difusión turbulenta).

De esta forma el mezclado ocurre mediante el transporte másico de acuerdo a los patrones de circulación del fluido, originado por la turbulencia generada de las burbujas.

Algunos reportes de Tata Steel <sup>16</sup> confirman que varios factores influyen en el tiempo de mezclado. Se distinguen: geometría de la olla, presencia de escoria, convección natural, adición del trazador, localización del punto de medición y rapidez de medición. Turkoglu y Farouk <sup>17</sup> demostraron que el radio y la rapidez de inyección son cruciales para determinar el tiempo de mezclado.

Nakanishi y colaboradores <sup>18</sup> fueron los primeros en reportar datos sobre el mezclado respecto a la velocidad global de disipación de energía específica de una unidad de desgasificado al vacío, reportaron la siguiente ecuación para el tiempo de mezclado:

$$\tau_m = 12.68 \times 10^3 \varepsilon_m^{-0.4} \quad (2)$$

Donde  $\tau_m$  es el tiempo de mezclado y  $\varepsilon_m$  es la velocidad de disipación de energía.

Las técnicas de medición de soluto son variadas, pero se generalizan en mediciones de pH y de conductividad eléctrica. En la Tabla 2 se tiene un compendio de diversas investigaciones reportadas en la literatura y la correlación encontrada para el tiempo de mezclado bajo los efectos de distintas variables.

**Tabla 2.** Investigaciones principales en la determinación de correlación del tiempo de mezclado <sup>2,19</sup>.

Investigadores	Técnica	Criterio	Dimensiones	Flujo ((L/min)/Ton)	Correlación
Nakanishi et al.	pH	Indefinido	L=0.465m D=0.42m; 64Kg	15 a 60	$\tau_m = 800\epsilon_m^{-0.4}$
Asai et al.	Conductividad	99%	D=0.405, 0.2 y 0.1m L/D=0.5 a 1 52Kg(max) y 0.4Kg(min)	19 a 90 (referido en D=0.405m y L=0.4m)	$\tau_m = 274\epsilon_m^{-0.22} L^{-1} R^{1.28}$
Sinha y McNallan	pH	97.7%	L=0.48m D=0.45m 76Kg	20 a 400	$\tau_m = 692\epsilon_m^{-0.37}$
Themelis y Stapurewicz	Foto celda	95%	L=0.67 a 1m D=0.66m 310kg(max)	130 a 960	$\tau_m = 169\epsilon_m^{-0.22} L^{0.22}$
Mietz y Oeters	Conductividad y colorimetría	95%	L=1.0m D=0.63m 311Kg	38 a 290	$\tau_m = C_1 Q_2^{-n}$  <i>siendo <math>C_1</math> y <math>n</math> funcion de la adición y monitoreo del trazador</i>
Mazumdar y Guthrie	Conductividad	95%	L=0.5 a 1.1m D=1.12 m 1000Kg	12 a 6	$\tau_m = 37\epsilon_m^{-0.22} L^{-1} R^{1.88}$
Krishnamurthy y otros.	Conductividad	99.9%	L=0.1 a 0.45m D= 0.48m 81Kg(max)	11 a 267	$\tau_m = C_1 Q_2^{-n}$  <i>siendo <math>C_1</math> y <math>n</math> funcion del flujo y de la cantidad de baño</i>
Sano y Mori	Estimación teórica de mezclado perfecto				$\tau_m = 174Q^{-0.22} R^{1.22} L^{-0.87}$
Asai y otros	Conductividad	99.9%	L=0.2m D=0.4m		$\tau_m = 187(\rho_1 Q)^{-0.22} R^{1.0} L^{-1.0}$
Neifer y Rodi	pH	95%	L=0.64m D=0.64m		$\tau_m = 1613 \left( \frac{\rho_{2a}}{\rho_{2b}} Q \right)^{-0.22} R^{1.0} L^{-0.84}$
Mazumdar y Guthrie	Conductividad	95%	L=0.93m D=1.12m		$\tau_m = 25.4Q^{-0.22} R^{1.22} L^{-1.0}$

Para la medición o la visualización de los patrones de flujo se recomiendan sustancias que se arrastren con el fluido con densidad similar al agua. Estas pueden ser hojuelas de aluminio, azul de metileno o partículas plásticas esféricas (ejemplo, polimetil-metacrilato) <sup>15</sup>.

Para medir el mezclado de soluto en los modelos físicos, se utilizan diversas sustancias, pero se recomiendan sustancias con alta solubilidad con el fin de tener una medición precisa al efecto de disipación, suelen usarse ácidos o bases fuertes en alta concentración (por lo menos 0.1 M).

La posición de adición del trazador posee un gran efecto en el mezclado. Específicamente el mejor lugar de adición de soluto es el “ojo” de la pluma generada en la parte superficial del baño líquido, esto debido al rompimiento de las burbujas y al perfil de velocidades.

Así como la posición del trazador es de gran influencia, el lugar de medición es determinante para el resultado <sup>19</sup>. Mazumdar y colaboradores <sup>20</sup>, observaron la influencia del sitio de medición en el mezclado.

La Figura 6, muestra el efecto del sitio de medición en modelos físicos de diferente tamaño (a) sobre el mezclado, mostrando los resultados de composición del trazador contra el tiempo (b).

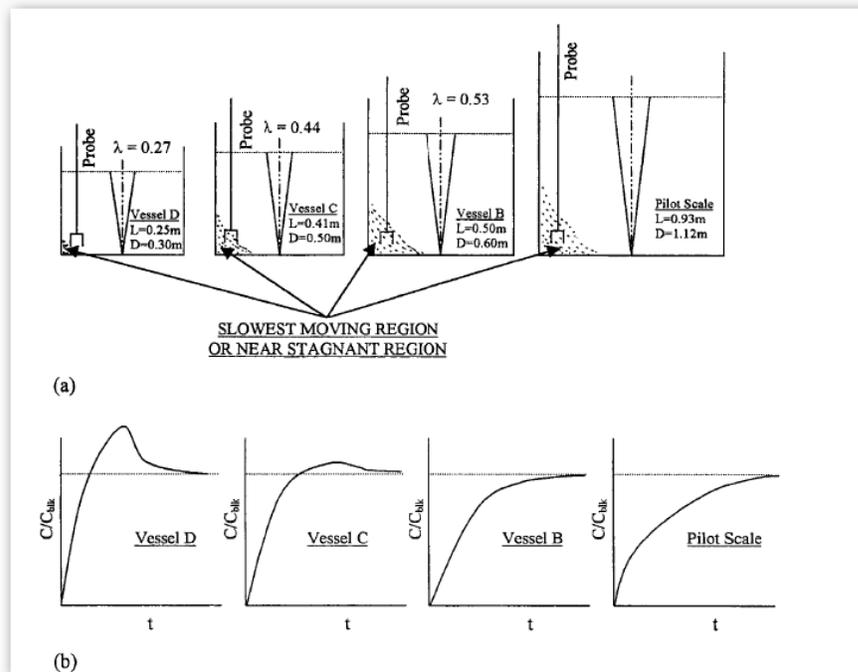


Figura 6. Influencia de diferentes tamaños de modelo físico en la medición de tiempo de mezclado <sup>20</sup>.

En la Figura 7, se observa la diferencia entre los resultados de concentración adimensional y el tiempo de mezclado, según el sitio de medición. La imagen muestra que se pueden tener resultados distintos variando el punto de medición de soluto.

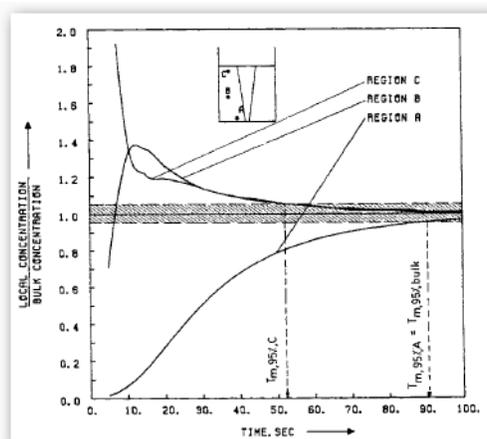


Figura 7. Concentración contra tiempo de mezclado en diferentes puntos de medición <sup>20</sup>.

## B - Modelación matemática

Cuando se utiliza la modelación matemática para la descripción de fenómenos como los ocurridos en el HO, y al tener dos fases en contacto se tienen tres metodologías de evaluación:

Eureliano-cuasimonofase: se basa en discriminar la fase gaseosa como una fracción determinada de la fase líquida, ajustando el comportamiento de la fase líquida como una mezcla determinada.

Eureliano bifásico: caracteriza individualmente a la fase gaseosa y líquida, siendo interdependientes.

Eureliano-Lagrangiano: La fase gaseosa es determinada como una ecuación de trayectoria y es determinada su cantidad y volumen.

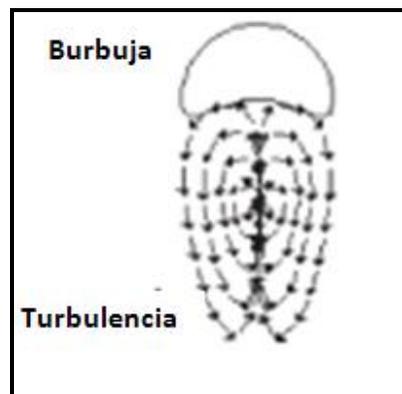
Estas diferentes metodologías de modelación difieren en el tiempo de cálculo requerido y requieren del conocimiento de algunas características del sistema *a priori*.

## C - Combinación de modelos físicos y matemáticos

Los estudios que combinan modelos matemáticos y físicos enriquecen los resultados, dando indicios de errores de medición y ayudan a la validación del modelado matemático con las mediciones hechas en el modelo físico.

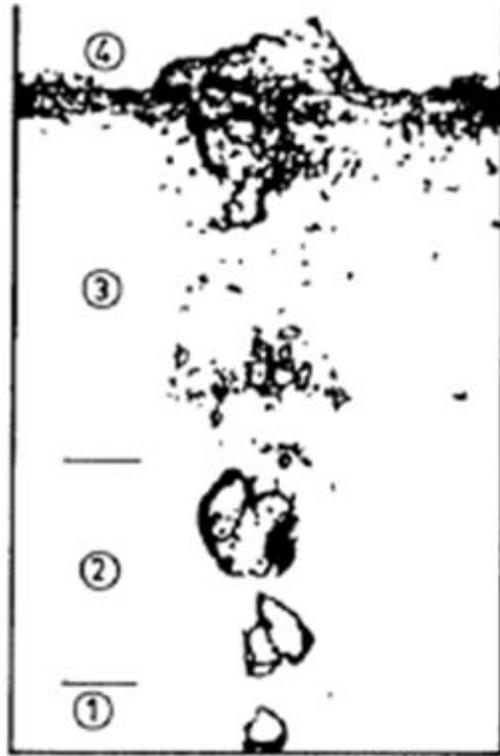
## 2.2 FENOMENOLOGÍA DEL PROCESO

La agitación asistida con gases insuflados es un fenómeno con alta emisión de turbulencia (mostrada en la Figura 8), tal que supera en gran medida la agitación provocada por propelas o inducción magnética. Esto es ocasionado por la interacción de fuerzas boyantes, inerciales y gravitacionales, originadas por la diferencia de propiedades del baño y del gas inyectado.



**Figura 8.** Esquema de la zona turbulencia formada por una burbuja del proceso de insuflado de gas<sup>6</sup>.

Dada la alta cantidad de burbujas, la turbulencia es propagada por el baño líquido, formando así un sistema bifásico que se compone de 3 a 4% en volumen de gas. Este gas se distribuye según se presenta en fotografía de la Figura 9 desde su entrada al sistema a través de una tapón abierta, donde se observan cuatro zonas denominadas: 1- Burbuja primaria, 2- Burbuja libre, 3- Pluma y 4- Chorro<sup>21</sup>.



**Figura 9.** Zonas que caracterizan la distribución de burbujas en el baño líquido <sup>21</sup>.

La zona denominada pluma es donde se concentra la mayor cantidad de burbujas y por ende controla la turbulencia. Esta zona es dependiente del flujo de gas, cantidad de baño y posición del tapón.

## **HIPÓTESIS**

Un modelo físico de acrílico con agua y aire inyectado por el fondo se usará para estudiar el mezclado en HO. El mezclado está gobernado por fenómenos de flujo de fluidos y las principales variables de proceso son: flujo de gas, posición de tapón y cantidad de tapones abiertos. El modelo físico ayudará a encontrar las condiciones de operación que optimicen el mezclado.

## **OBJETIVOS**

- Simular el mezclado de acero contenido en un horno olla mediante un trazador en un modelo físico de acrílico con agua e inyección de aire por el fondo que representa al acero y al argón respectivamente.
- Evaluar el efecto de flujo de gas, posición y número de tapones abiertos sobre los tiempos de mezclado.

## **Capítulo 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Los pasos a seguir para el trabajo experimental fueron los siguientes:

1.- Instalación del modelo físico. 2.- Pruebas preliminares para determinar el tipo de agua, trazador y ajustes a los accesorios de instalación. 3.- Determinación de condiciones de operación. 4.- Diseño experimental. 5.- Protocolo de experimentación.

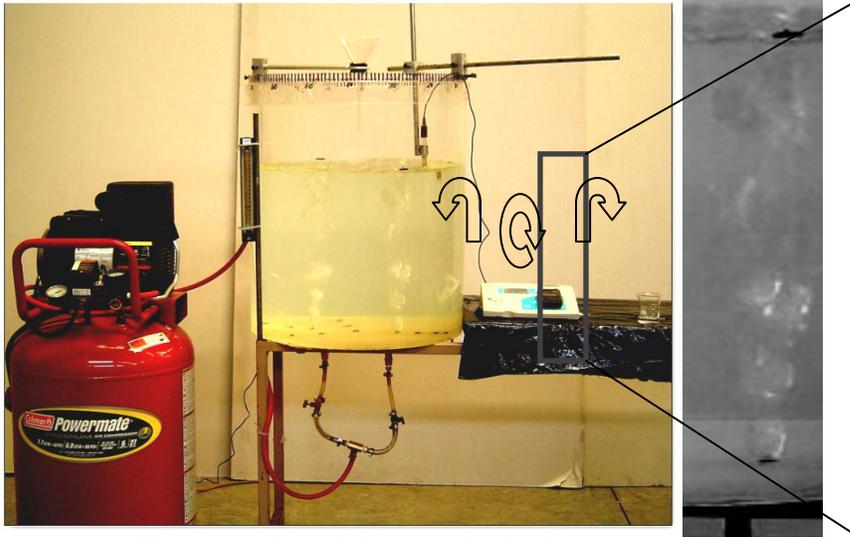
### **3.1 INSTALACIÓN DEL MODELO FÍSICO**

La Figura 10 muestra la instalación del modelo físico usado para los experimentos desarrollados, donde esta instalación particular se encuentra preparada para los experimentos con dos tapones a  $1/3$  del radio (ver Tabla 5). Los elementos marcados son: 1.- Embudo de adición de trazador, 2.- Electrodo medidor de pH, 3.- Flujometro, 4.- Compresor, 5.- Distribución de flujo de gas, 6.- Conexión rápida de gas en el fondo de la olla, 7.- pH-metro, 8.- Cronómetro, 9.- Trazador en vaso de precipitado. 10.- Olla con una altura de 63.5 cm, siendo la altura del baño de 41 cm lo que equivale aproximadamente 90 L de agua.



**Figura 10.** Instalación de modelo físico y accesorios usados.

Por otro lado la Figura 11 muestra un ejemplo de la operación del modelo físico durante el experimento 15 (ver Tabla 5). En este arreglo se colocó el electrodo a 180° del sistema de adición de trazador con fines ilustrativos, ya que durante los experimentos, la medición de pH no se realizó en ese sitio. Las flechas de la figura indican la dirección del flujo producidas por la inyección de gas. Se observa la formación de la pluma de gas en el acercamiento mostrado en el lado derecho de la Figura 11.



**Figura 11.** Fotografía de ejemplo del funcionamiento de la instalación durante una prueba de dos tapones abiertos a  $1/3$  del radio y con un flujo de 40 L/min.

La Figura 12 muestra un esquema detallado de la instalación y sus variantes para ajustar el experimento. Los elementos indicados en la figura son:

a) Mecanismo de inserción de trazador: se conforma de un embudo (1) donde se adiciona el trazador para permitir una entrada de trazador uniforme en todos los experimentos. También hay un soporte metálico (2) que se puede ajustar en su longitud para adaptarse al sitio de adición del trazador.

b) Mecanismo de ubicación de medición: se conforma de un soporte metálico que se puede ajustar para posicionar al electrodo en el punto de medición deseado, regulando la posición del medidor respecto al radio de la olla (3) y en posición vertical (4) controla la profundidad de inmersión del electrodo en el baño, sujetador de electrodo (5) que permite mantener el electrodo fijo ante el arrastre del fluido, y electrodo (6).

c) Distribución de flujo: esta es adaptable para el tipo de experimento y se puede ordenar según la cantidad de tapones necesarios para abrir: para tres (9), para dos (10) y uno (11). Están indicados los flujos de entrada y salida con flechas. Esta zona se conecta al flujómetro mediante mangueras para gas (7). Cuando se tiene un solo tapón abierto no es necesaria esta conexión, ya que se conecta directamente la inyección de gas.

d) Inyección de gas, esta zona depende de la(s) posición(es) necesaria(s) para el experimento. Se compone de conexión a manguera, conexión rápida macho (12) y conexión rápida hembra (13). Todas las conexiones son de  $\frac{1}{4}$  de pulga de apertura y de tipo gas.

e) El sitio 8 corresponde a la conexión mediante manguera del compresor al flujómetro, el sitio 14 es la conexión electrodo-pHmetro.

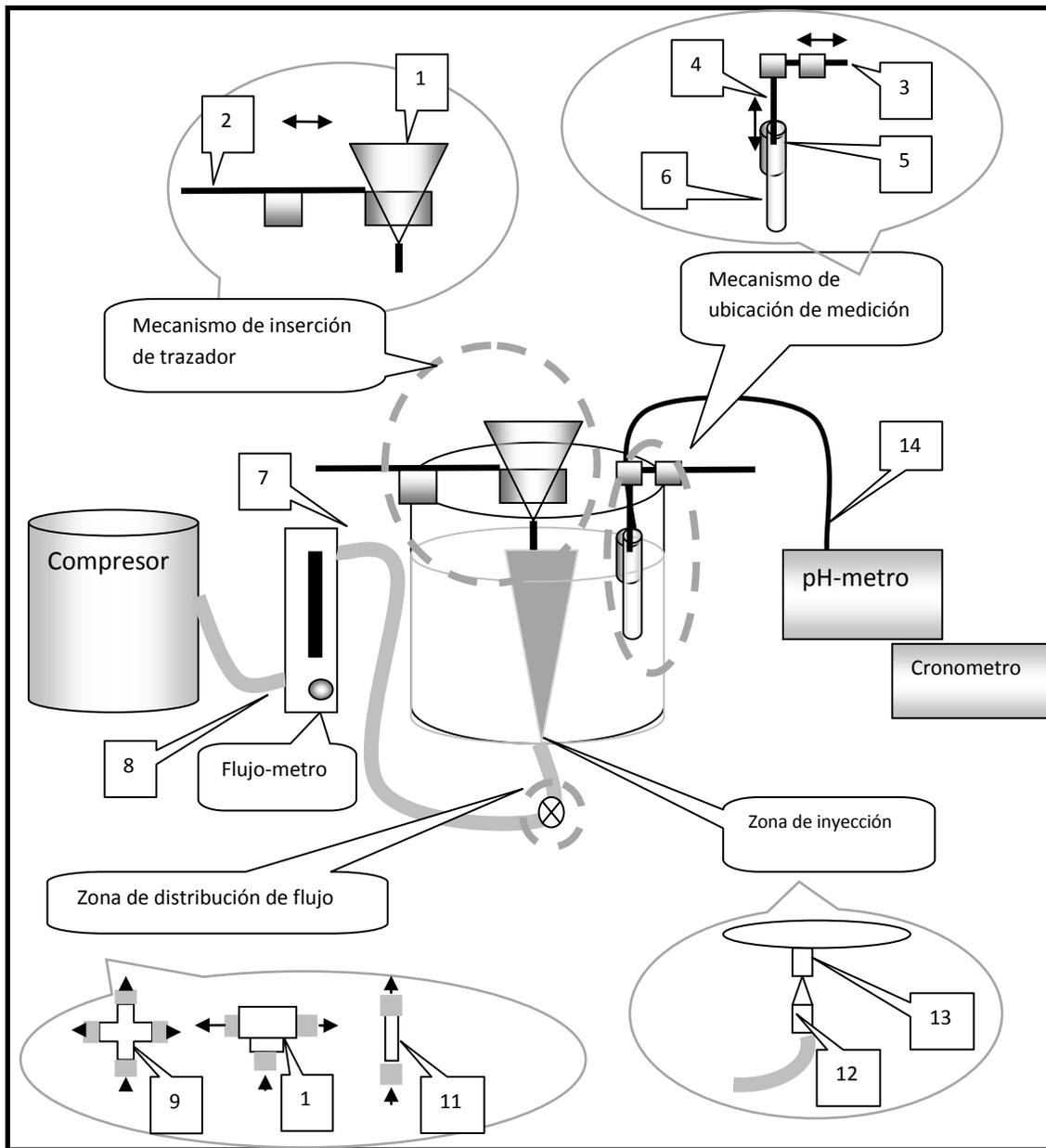


Figura 12. Esquema detallado de la instalación del modelo físico y accesorios.

### 3.2 PRUEBAS PRELIMINARES

Se realizaron pruebas preliminares para determinar el uso de agua corriente o agua destilada. Se encontró que el agua corriente no da resultados confiables debido a su variación de concentración de sales, en tanto que el agua destilada puede ser usada hasta por 20 pruebas sin tener efectos nocivos en la medición de pH.

Se determinó usar NaOH 1 M como trazador, ya que tiene disociación inmediata en agua.

El pH de inicio de prueba fue de 6.02-6.03, ya que contiene una baja cantidad de protones y una casi nula cantidad de  $\text{OH}^-$ , y el pH de fin de prueba fue de 9.79 a 9.92, manteniendo una concentración de  $\text{OH}^-$  más de mil veces mayor a la inicial y una pequeña cantidad de protones.

La limpieza y calibración del instrumental es vital para la disminución de error experimental. Al tener el tiempo de vida del agua, los valores de inicio y final del pH en cada prueba garantizan mediciones precisas. Al final de cada prueba se reajusta el pH a su valor inicial mediante soluciones de HCl y NaOH de 0.1, 0.5 y 1 M, además de HCl 6 M.

### 3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El recipiente escalado fue diseñado en un trabajo previo <sup>22</sup>, a una escala de 1/6 de un horno olla industrial de la empresa TAMSA (ver Tabla 3), y estos datos son fijos para este proyecto.

**Tabla 3.** Datos de escalamiento dimensional del modelo físico <sup>22</sup>.

	Altura del horno (m)	Altura de baño (m)	Diámetro del horno (m)
Olla industrial (140 Toneladas)	3.736	2.460	3.226
Modelo físico	0.622	0.410	0.537

El escalamiento dinámico se realiza ajustando los flujos de gas inyectado <sup>23</sup>, el cual utiliza un exponente de 2.5 sobre el factor de escala ( $\lambda=1/6$ ) para relacionar el flujo de gas inyectado en la olla ( $Q_{mod}$ ) respecto al flujo inyectado en el modelo ( $Q_{fs}$ ) y los resultados de este escalamiento se ven en la Tabla 4. La ecuación 3 define este escalamiento.

$$Q_{mod} = \lambda^{2.5} Q_{fs} \quad (3)$$

**Tabla 4.** Escalamiento dinámico usado.

	Flujos de gas (m <sup>3</sup> /min)			Flujos de gas (L/min)		
Olla industrial	0.882	1.764	3.527	882	1764	3527
Modelo físico	0.01	0.02	0.04	10	20	40

Estos datos de flujo de gas se encuentran en el rango operativo de la planta de TAMSA (13.605 a 40.8 L/min<sup>22</sup>). Se determinó usar un flujo bajo de 10 L/min hasta 40 L/min para observar los efectos del flujo de gas. Estos flujos son usados para homogeneización química y térmica del acero.

Los tapones también tienen tamaño fijo (abertura de ¼ de pulgada), las posiciones donde se encuentran son de uso común (centro, 1/3, 1/2 y 2/3 del radio de la olla) y son fijas para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto.

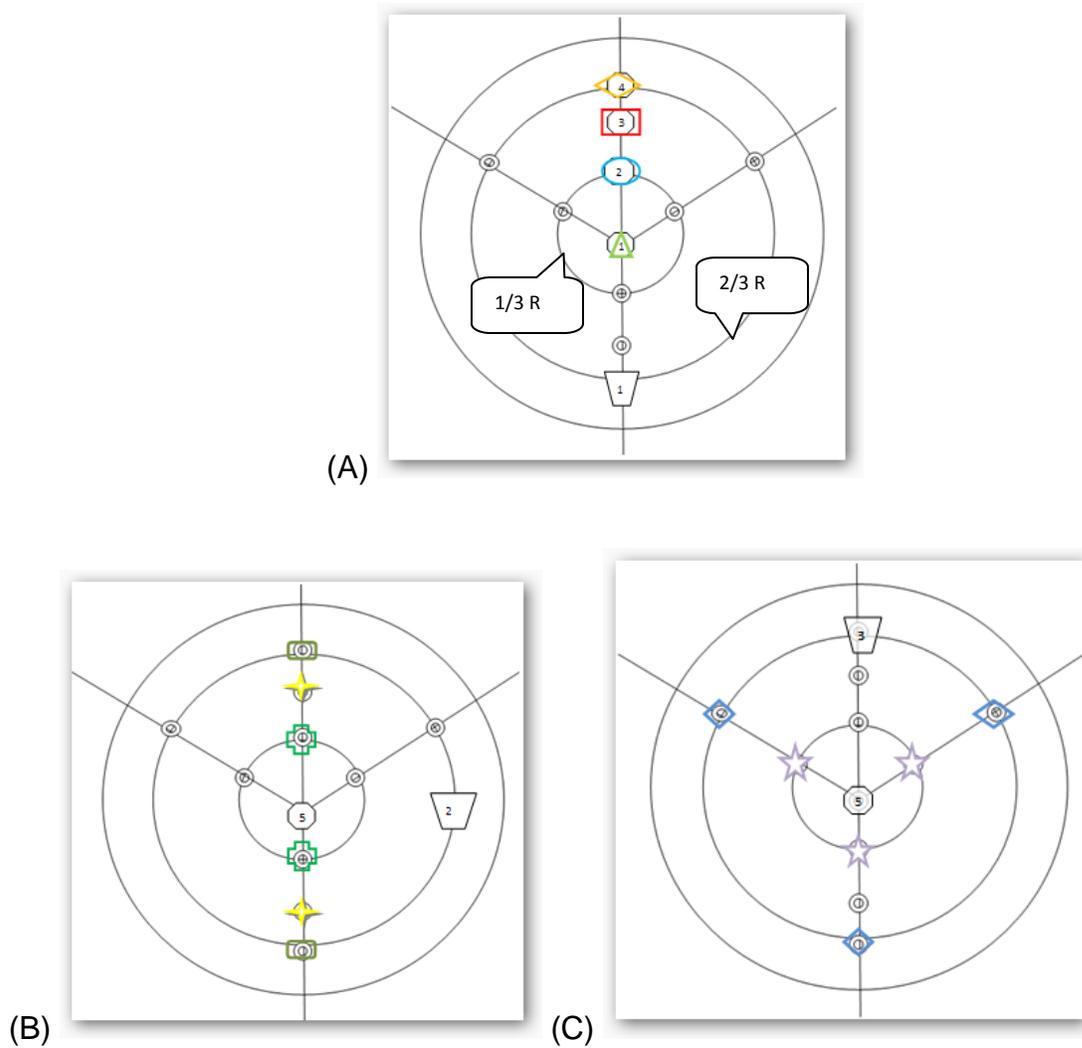
### 3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la Tabla 5 se ha resaltado las condiciones estándar de operación que representan un punto intermedio de las variables respecto a los rangos altos y bajos del flujo de gas, posición y número de inyectores. Las condiciones estándar son: 1 tapón colocado a  $2/3$  del radio de la olla en el fondo por donde se inyectan 20 L/min de aire (sombreado en verde).

Dados los rangos operativos de los valores del flujo de gas, posición y cantidad de tapones abiertos, se usó la matriz de experimentos presentada en la Tabla 5. Además, cada experimento se realizó por triplicado para obtener una estimación del error experimental.

**Tabla 5.** Matriz de experimentos usado en el presente trabajo.

	Experimento	Flujo (L/min)	Posición (r/R)	Numero de tapones	Representativo	Posición de trazador	Posición de electrodo
Efecto posición	1	10	0	1			
	2	20					
	3	40					
	4	10	$\frac{1}{3}$	1			
	5	20					
	6	40					
	7	10	$\frac{2}{3}$	1			
	8	20					
	9	40					
	10	10	$\frac{1}{2}$	1			
	11	20					
	12	40					
Efecto dos tapones	13	10	$\frac{1}{3}, \frac{1}{3}$	2			
	14	20					
	15	40					
	16	10	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$	2			
	17	20					
	18	40					
	19	10	$\frac{2}{3}, \frac{2}{3}$	2			
	20	20					
	21	40					
Efecto tres tapones	22	10	$\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}$	3			
	23	20					
	24	40					
	25	10	$\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3}$	3			
	26	20					
	27	40					



**Figura 13.** Esquema de posición de un tapón abierto (A), posición con dos tapones abiertos (B) y tres tapones abiertos (C).

La Tabla 5 y la Figura 13 muestran a través de símbolos las posiciones de inyección de aire, del trazador y de medición del pH, siendo en la figura con una vista superior fácilmente localizables estos sitios. La posición del electrodo es lo más lejano posible de los ojos de pluma que se forman.

### **3.5 Protocolo de experimentación.**

Para la realización de los experimentos se siguió un protocolo, y así disminuir el error experimental y minimizar las variables externas (como puede ser la temperatura del agua).

El protocolo comprende:

- 1) Montaje y desmontaje.
- 2) Proceso experimental.
- 3) Tratamiento de datos.

#### **3.5.1 Montaje y desmontaje.**

Para este cometido se realizan los siguientes pasos:

- A) Chequeo de inventario
- B) limpieza del equipo
- C) calibración de equipo y
- D) colocación de electrodo, embudo de adición de trazador e instalación de distribución de gas.

A) Chequeo de inventario. El material y reactivos siguientes se mantuvieron al alcance durante todo el desarrollo experimental, y al comienzo del día de experimentación se verifico su estado:

- Electrodo y pHmetro del equipo PC510 marca Eutech.

- Termómetro de mercurio.
- Compresor.
- Cámara de video.
- Cronometro deportivo.
- Extensiones eléctricas.
- Soporte para electrodo.
- Soporte para embudo de adición de trazador
- Flujometro (en litros por minuto)
- Cinta de teflón
- Nivel
- Garrafones de agua destilada (depende del uso)
- Piseta
- 5 Vasos de precipitados de 100 mL
- 10 Frascos de 500 mL de PVC.
- Soluciones Buffer (4.01, 7.00 y 10.01), marca
- Solución electrolítica
- Reactivos de NaOH de concentraciones 1, 0.5 y 0.1 M, un litro cada uno.
- Reactivos de HCl de concentraciones 6, 1, 0.5 y 0.1 M, un litro cada uno.
- Dos embudos.
- Dos pipetas de 3 mL y una de 10 mL.
- Una propipeta.
- Mangueras para gas de  $\frac{1}{4}$ ".
- Tres conexiones rápidas macho de  $\frac{1}{4}$ " de bronce.

- Tres coples con rosca interior de ¼" de bronce.
- Cinco espigas (conexión manguera) de ¼" de bronce.
- Tres espigas (conexión manguera) de ¼", rosca fina de bronce.
- Conexión en T de ¼" de bronce.
- Conexión en cruz de ¼" de bronce, rosca fina.
- Tres válvulas de ¼" de bronce.

#### B) Limpieza del equipo.

- Todo el equipo de laboratorio (pipetas, vasos de precipitados y embudos), se limpia antes de la experimentación con agua y jabón.
- Las conexiones de cobre y los soportes, se limpian ante la presencia de óxidos, con lijas, agua y jabón.
- El agua destilada, se cambia cuando: se tengan partículas suspendidas o depositadas, y después de 20 experimentos se reemplazan 20 L de agua de uso por destilada.
- Al finalizar o suspender la experimentación, si el agua se mantiene en la olla, se tapa con una bolsa negra que impida el paso de partículas.

### C) Calibración de equipo.

- Se coloca el termómetro en el centro de la olla sumergido 5 cm durante 3 minutos, pasado el tiempo se toma medida de temperatura.
- Se conecta el pHmetro al electrodo y se ajusta a la temperatura registrada por el termómetro.
- Tras la limpieza del electrodo con agua destilada, se calibra con las soluciones buffer con pH de 7.00, 4.01 y 10.01 respectivamente, realizando entre cada cambio de solución limpieza de la membrana del electrodo con agua destilada.

### D) Colocación de electrodo, embudo de adición de trazador e instalación de distribución de gas.

- Siguiendo la colocación respecto a la Figura 13, los soportes son ajustados a las zonas determinadas, manteniendo la horizontal mediante el uso del nivel.
- La separación de la boca del embudo al baño se mantiene a 7 cm y la profundidad del electrodo es de 5 cm.
- La instalación de gas, se realiza respecto a las necesidades del experimento, las roscas son selladas con la cinta de teflón y antes de la experimentación se checa la existencia de fugas.

- Después de la experimentación se desmontan los soportes y la instalación de gas (de las conexiones rápidas macho).

### 3.5.2 Proceso experimental

- Se inyecta gas a 60 L/min durante 3 minutos o hasta tener una medición inicial de pH sin variaciones.
- Se ajusta a 6.02 o 6.03 de pH, mediante las soluciones de NaOH y HCl.
- Se ajusta el flujo de gas al que se usara durante la experimentación y se mantiene 2 minutos, si no se mantiene el pH se aumenta el flujo a 60 L/min y se reajusta el pH con NaOH o HCl.
- Mantenido el flujo y el pH, se enciende la cámara (con enfoque al pHmetro y cronometro), se acciona el cronometro, se inicia grabación y se menciona las características de la prueba (numero de prueba, flujo, posición, cantidad de tapones abiertos y fecha de elaboración) y se menciona el inicio y fin de adición del trazador.
- Durante la prueba se mantiene control del flujo de gas.
- La prueba dura entre 2:30 y 3:00 minutos, respecto a la variación de pH que se observe.

- Finalizado el tiempo se repiten las características de la prueba, se detiene la grabación, se incrementa el flujo a 60 L/min y se ajusta el pH a 6.02 o 6.03 con las soluciones de NaOH y HCl para iniciar otro experimento o réplica.

### 3.5.3 Tratamiento de datos

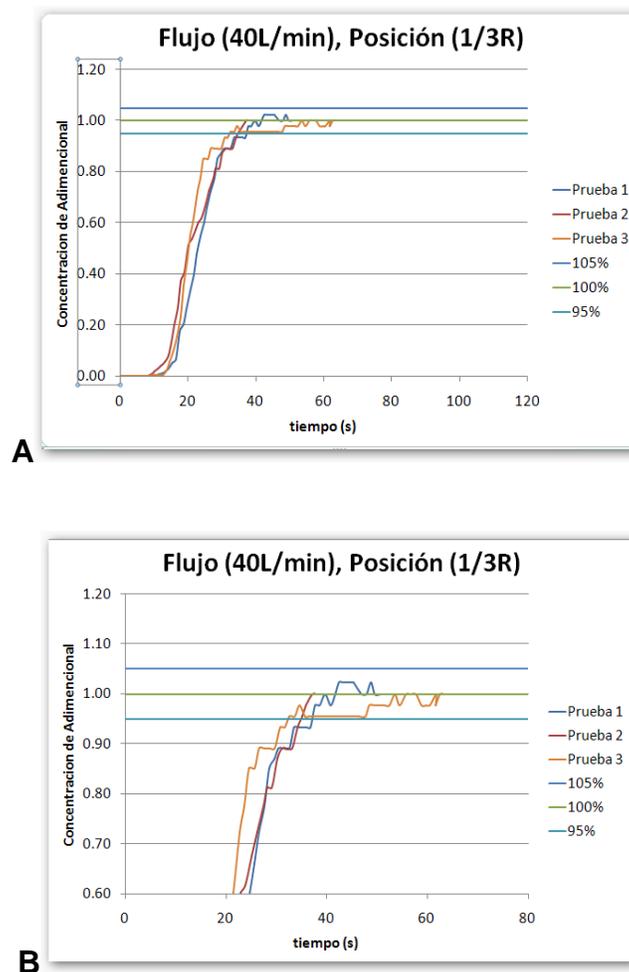
- En hojas de Excel, se registra el pH de inicio, el tiempo de adición de trazador, al finalizar la adición de trazador se toma el tiempo como el inicio de prueba.
- Desde el inicio de prueba y hasta 120 segundos, se registra el pH cada segundo.
- Al finalizar la prueba se registra el tiempo de prueba y el pH final.
- El pH final se transforma a concentración y se evalúa el pH de los registros entre 95 y 105% de concentración. Cuando los registros muestran que la variación de pH no rebasa el 95 o 105%, se toma el tiempo mínimo en que se alcanza cualquiera de los límites. Dicho tiempo es tomado como el tiempo de mezclado.

## Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Ejemplo de la determinación de tiempo de mezclado.

En la Figura 14 se muestra la concentración adimensional\*\* de NaOH contra el tiempo medido desde la inyección del trazador en el modelo físico. Esta figura que sirve de ilustración corresponde a las condiciones de operación con un flujo de 40 L/min y un tapón colocado a 1/3 del radio de la olla. Las posiciones de inyección del trazador y de medición de pH se pueden ver en la Tabla 5 y Figura 13. Las tres líneas de la figura son las tres réplicas de este experimento, mientras que las líneas horizontales representan la concentración de equilibrio (concentración de uno) y el  $\pm 5\%$  de esta concentración, es decir, la ventana que define al mezclado (se encuentran en todas las figuras de resultados). La figura de la izquierda es la gráfica de concentración obtenida mientras que la figura de la derecha es un acercamiento que ayuda a determinar con precisión el tiempo de mezclado. En este ejemplo, los tiempos de mezclado de las tres réplicas son: 30.40 segundos (línea azul), 35.04 segundos (línea roja) y 32.56 segundos (línea naranja). Básicamente, las concentraciones crecen desde la concentración cero a un cierto tiempo hasta que eventualmente logran el equilibrio químico. El tiempo en que comienza a medirse la concentración es el tiempo que tarda el soluto arrastrado por el fluido en moverse desde el punto de inyección de trazador al punto de medición de pH y se conoce como tiempo de circulación.

En este ejemplo la concentración crece desde cero hasta alcanzar el valor de mezclado y este comportamiento está asociado con el mecanismo de transporte de masa por difusión turbulenta y no por convección. Esto indica que el sitio seleccionado para medir la concentración está alejado de los circuitos convectivos en la olla. En el caso presentado el electrodo medidor de pH está localizado en la parte superior de la olla 180° de la pluma a 7 cm de la pared de la olla e inmerso a 6 cm de profundidad en el agua.

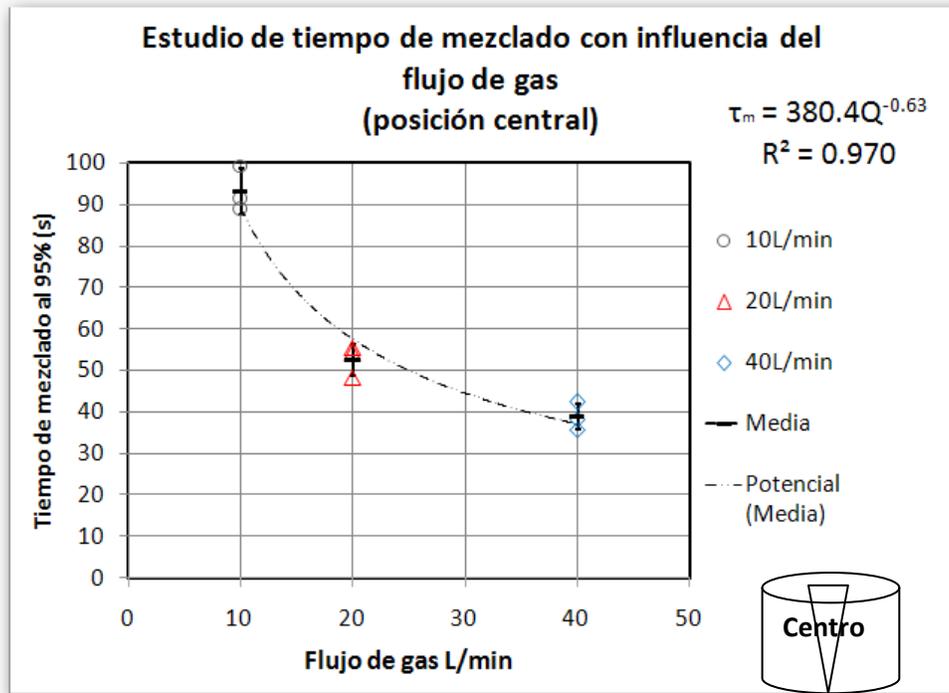


**Figura 14.** Ejemplo de gráfico concentración contra tiempo, usado para determinar el tiempo promedio de mezclado. **A)** Escala general para la visualización del comportamiento del mezclado, **B)** acercamiento para determinar el tiempo de mezclado según tres pruebas o corridas.

## 4.2 INFLUENCIA DEL FLUJO DE GAS Y DE LA POSICIÓN DE INYECCIÓN

### 4.2.1 Un tapón abierto

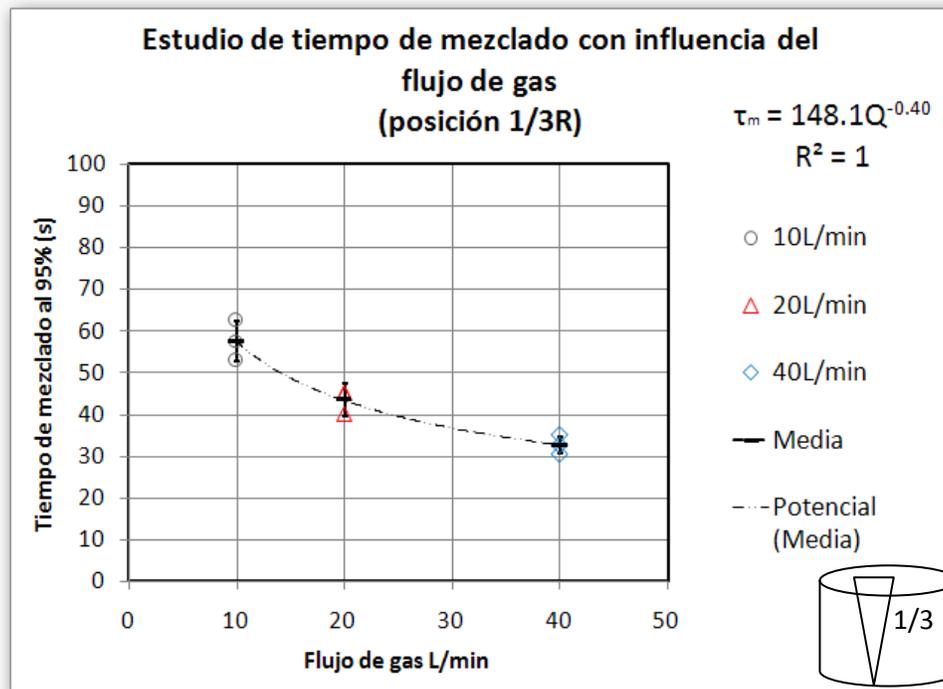
La Figura 15 corresponde al tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado por un solo tapón en la posición central de la olla. Se observan tres datos en cada flujo correspondientes a las replicas. Se determinaron los valores promedio del tiempo de mezclado y la desviación estándar que está ligada al error experimental (ilustrada en corchetes). La curva obtenida indica que el tiempo de mezclado es inversamente proporcional al flujo de gas y que el exponente\*\*\* de esta relación es de -0.63, superior a los reportados por Asai <sup>24</sup>, Mazumdar y Guthrie <sup>25</sup>, así como Neifer y Rodi <sup>26</sup> (ver Tabla 2). El tiempo de mezclado disminuye con el aumento del flujo de gas, ya que al inyectar más gas hay más burbujas habiendo más arrastre y mayor turbulencia, lo que genera mayor convección y disipación turbulenta dentro del agua, es decir, una mayor rapidez de mezclado. El mayor tiempo de mezclado resultó ser en promedio de  $93.05 \pm 5.05$  segundos con 10 L/min y el menor de  $38.81 \pm 2.88$  segundos con 40 L/min, es decir una disminución muy significativa en el tiempo de mezclado (mayor al doble) con un aumento de 4 veces el flujo de gas.



**Figura 15.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición central.

La Figura 16 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado por un solo tapón ubicado a 1/3 del radio. El exponente de la relación entre el tiempo de mezclado y el flujo de gas es ahora de -0.38, valor más cercano a los exponentes reportados en la Tabla 2. En esta posición de inyección de gas los resultados presentaron menor desviación estándar (en todos los casos menor a +/- 4.81 segundos). Nuevamente se encontró que un aumento en el flujo de gas provoca un mezclado más rápido. Sin embargo, en este caso con 10 L/min se obtuvo un tiempo de mezclado promedio de  $57.62 \pm 4.81$  segundos y con 40 L/min uno de  $32.66 \pm 2.32$  segundos, valores menores a los reportados en este trabajo con la inyección por el centro. Esta mejora en el mezclado cuando se inyecta el

mismo flujo de gas excéntricamente comparada con la inyección central, obedece a que está última genera zonas muertas en la parte inferior de la olla que tardan más tiempo en alcanzar el mezclado total.

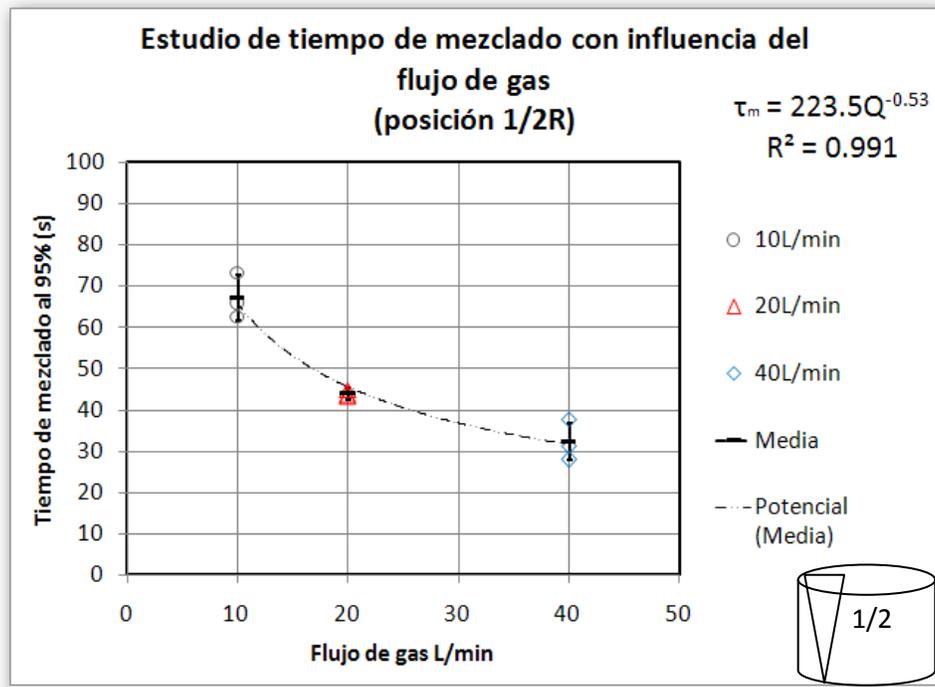


**Figura 16.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio.

La Figura 17 muestra el tiempo de mezclado como función del flujo de inyección de gas en la posición de  $1/2$  del radio de la olla. En este caso el exponente es de  $-0.53$ , alejado en  $0.2$  a los reportados en la Tabla 2. En estos experimentos se elevó la amplitud del error en el flujo de  $10$  L/min ( $\pm 5.48$  segundos).

Los tiempos de mezclado promedio a con la posición de inyección a  $1/2$  del radio son de  $67.26 \pm 5.48$  segundos con  $10$  L/min y de  $32.25 \pm 4.98$  segundos a  $40$

L/min, es decir muy parecidos a los encontrados en este trabajo con la posición de inyección de 1/3 del radio. Esto indica que los mecanismos de transporte convectivo y turbulento son parecidos en ambos puntos de inyección.

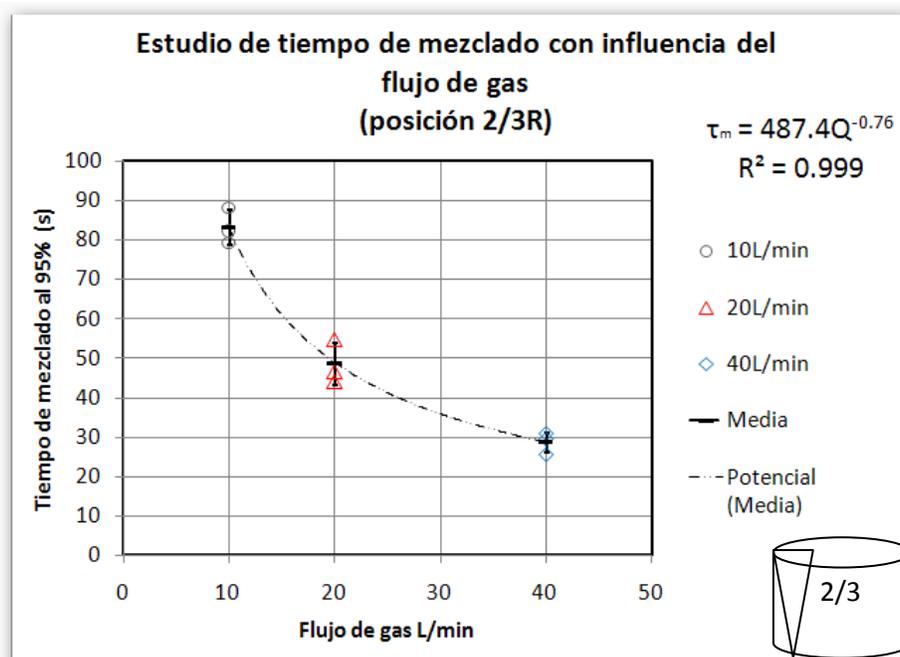


**Figura 17.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un medio de radio.

La Figura 18 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas pero ahora en una posición de inyección de 2/3 del radio de la olla. El exponente que relaciona el tiempo de mezclado con el flujo de gas es de -0.76, alejado a más del doble del reportado en la literatura (ver Tabla 2).

Sin embargo, los valores promedio del tiempo de mezclado son de  $83.25 \pm 4.55$  segundos a 10 L/min y de  $28.68 \pm 2.79$  segundos a 40 L/min, es decir, la variación

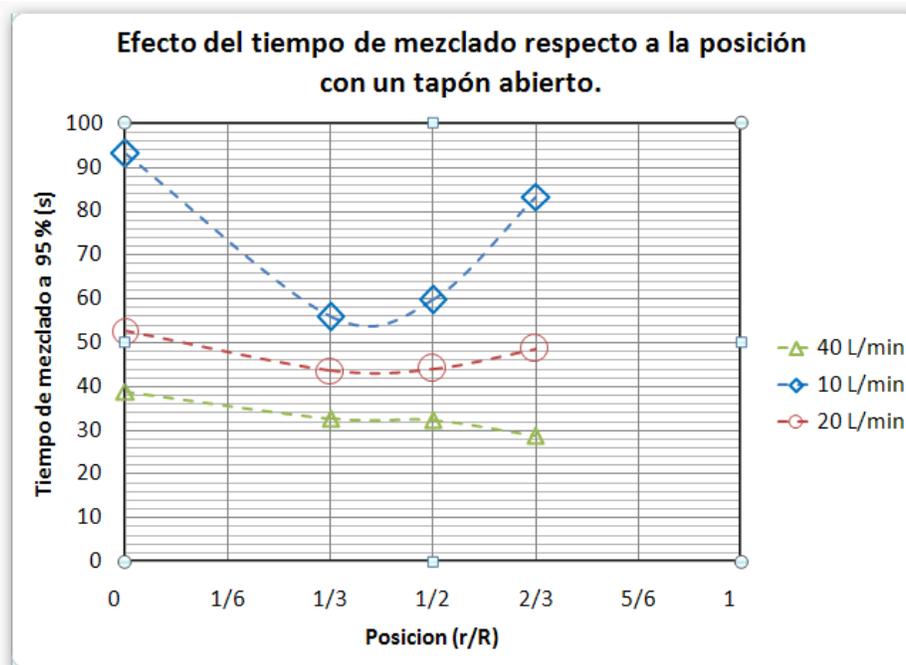
en la cinética del mezclado es muy sensible al flujo de gas en esta posición de inyección. Los 83 segundos con flujo de 10 L/min se pueden explicar al rozamiento que hay entre la pluma y la pared de la olla, ya que la posición de inyección está muy cercana a la pared. Esta fricción resta momentum a la pluma. En el caso de una industrial provocaría el desgaste del refractario por lo que esta posición no es recomendable.



**Figura 18.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio.

La Figura 19 muestra en forma condensada el comportamiento de tiempo de mezclado con respecto a la posición del tapón abierto y el flujo de gas inyectado. Las líneas se refieren al comportamiento a un flujo de gas constante (azul es a 10 L/min, roja a 20 L/min y verde a 40 L/min).

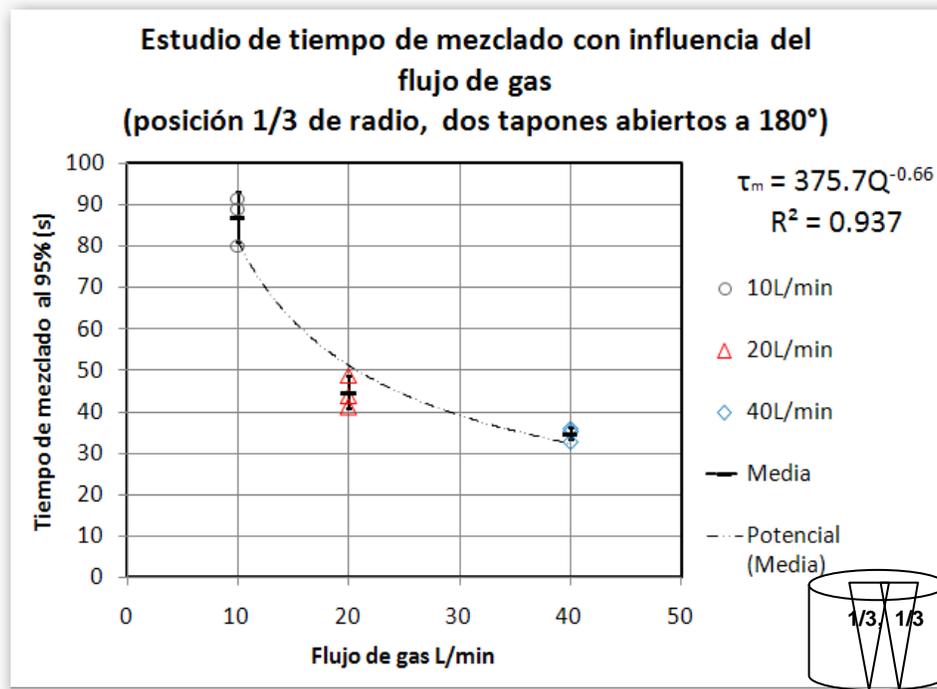
En general se ve que al aumentar la posición de inyección desde el centro disminuye el tiempo de mezclado porque se eliminan las zonas muertas provocadas en la inyección céntrica pero si se acerca mucho la posición de inyección a la pared de la olla se incrementa de nuevo el tiempo de mezclado debido al rozamiento con la pared que provoca una pérdida de cantidad de movimiento en la pluma. Este efecto de la pared es más marcado a flujos de gas bajos que a altos. Con 10 L/min se aprecia un mínimo a 1/3 del radio, mientras que a 40 L/min el tiempo de mezclado disminuye siempre que se aleja la posición de inyección del centro de la olla.



**Figura 19.** Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición (central, 1/3, 1/2 y 2/3 del radio de la olla) a diferentes flujos de inyección de gas.

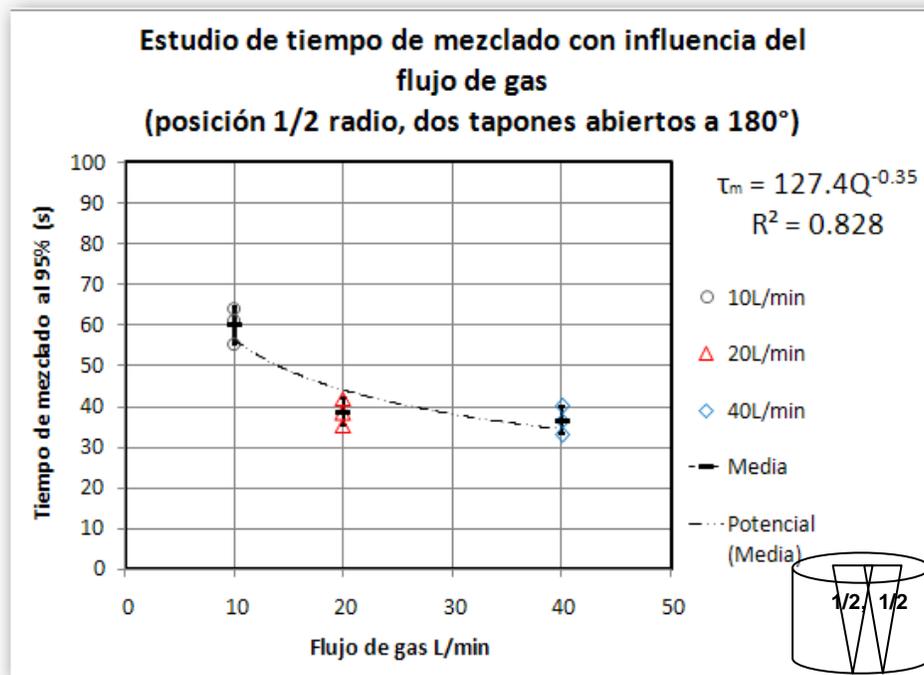
#### 4.2.2 Dos tapones abiertos y colocados a 180° uno del otro

La Figura 20 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado, en la posición de un tercio del radio con dos tapones abiertos a 180° uno del otro. La máxima desviación estándar es de +/- 6.07 segundos para el caso de flujo mínimo de gas (10 L/min). El tiempo de mezclado con ese flujo es de  $86.85 \pm 6.07$ , mientras que a flujo máximo de 40 L/min es de  $34.5 \pm 1.59$  segundos, los cuales resultaron ser tiempos mayores a los presentados con un solo tapón en la posición de un tercio de radio con los mismo flujos de gas; sin embargo, se conserva la tendencia de que al aumentar el flujo de gas se disminuye el tiempo de mezclado.



**Figura 20.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con dos tapones abiertos a 180°.

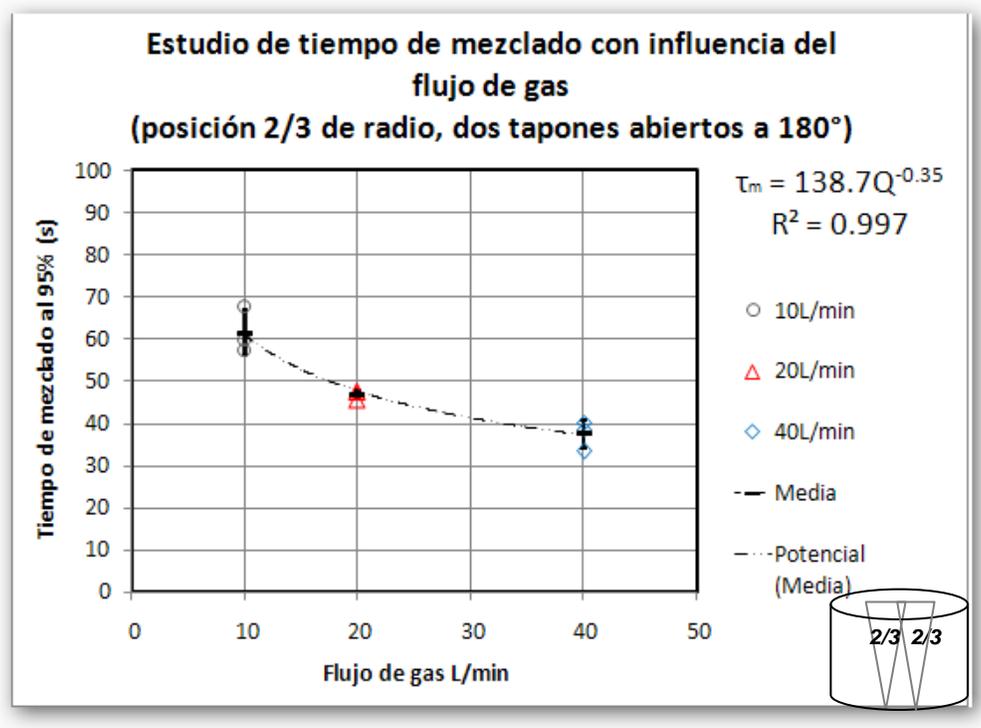
La Figura 21 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado, siendo dos tapones abiertos a 180° uno del otro en la posición de ½ del radio de la olla. Los tiempos de mezclado son de  $59.89 \pm 4.47$  segundos a 10 L/min y de  $36.55 \pm 3.66$  segundos a 40 L/min, siendo el primero menor al mostrado con un solo tapón en la posición de ½ del radio; pero, el segundo es mayor respecto al mismo experimento con un tapón. Esto indica que la turbulencia dada por dos tapones favorece el mezclado a flujo de 40 L/min, pero no es así con 10 L/min. El coeficiente que relaciona al tiempo de mezclado con el flujo de gas encontrado con estos experimentos se aproxima mucho al reportado por Asai<sup>24</sup>, Mazumdar y Guthrie<sup>25</sup>.



**Figura 21.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un medio de radio, con dos tapones abiertos a 180°

La Figura 22 muestra la variación del tiempo de mezclado respecto al flujo de gas inyectado con dos tapones abiertos a  $180^\circ$  uno del otro esta vez a  $2/3$  del radio de la olla. Los tiempos de mezclado corresponden a  $61.40 \pm 5.51$  segundos a 10 L/min, y a  $37.41 \pm 3.58$  segundos a 40L/min y el coeficiente que relaciona al tiempo de mezclado con el flujo de gas determinado es ligeramente inferior al coeficiente encontrado con dos tapones abiertos a  $1/2$  del radio, por lo que se infiere que el comportamiento del flujo del fluidos en ambos casos es similar (con 2 tapones a  $1/2$  del radio y dos tapones a  $2/3$  del radio).

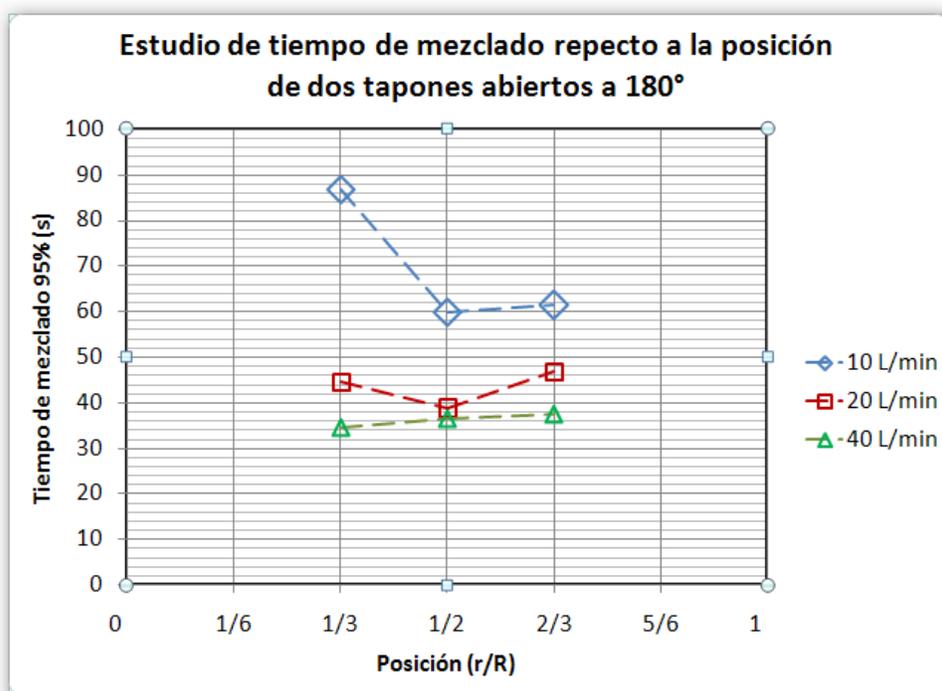
Comparando los tiempos de mezclado con los diversos flujos de gas y posiciones de inyección con dos tapones respecto a los tiempos de mezclado obtenidos con condiciones iguales pero con un tapón, en general se puede decir que con 2 tapones y flujo bajos (10 y 20 L/min) los tiempos de mezclado aumentan. Al inyectar con 2 tapones se crean dos circuitos de recirculación independientes, por lo que un soluto que este mezclándose en uno de ellos, pasará a la otra mitad de la olla solo por turbulencia y no por convección, aunque inyectar con 2 tapones supone una distribución mejor de la turbulencia en la olla. Esto explica los casi 30 segundos menos entre el tiempo de mezclado obtenido con un tapón contra el tiempo obtenido para mezclar el soluto con 2 tapones a flujo de 10L/min y  $1/3$  del radio, a pesar de que el soluto se inyectó justo entre las dos plumas con los dos tapones.



**Figura 22.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con dos tapones abiertos a 180°

La Figura 23 presenta la relación del tiempo de mezclado en función de la posición de inyección usando dos tapones abiertos a 180° uno del otro y con diferentes flujos de gas inyectado (cada línea en esta figura está a flujo constante). Se observa el decaimiento del tiempo de mezclado al alejarse del centro de la olla a flujos de 10 y 20 L/min hasta 1/2 del radio; pero, al acercarse a la pared de la olla (2/3 del radio) el tiempo de mezclado aumenta para cualquiera de los tres flujos. Esto es dado por la fricción dada por el rozamiento de la pluma de burbujas y la pared de la olla.

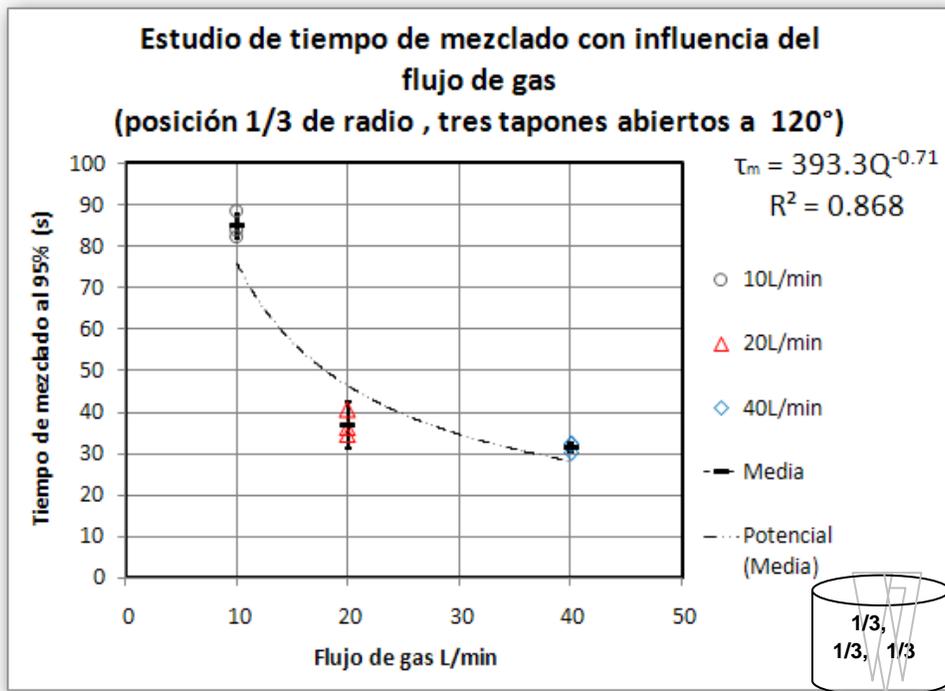
Es de considerar que para la posición de  $\frac{1}{2}$  del radio, el tiempo de mezclado a 20 y 40 L/min es casi el mismo, indicando que el uso de 20 L/min es conveniente ante un aumento del doble de volumen de gas que no disminuirá en gran medida el tiempo de mezclado con dos tapones. A 40L/min el tiempo de mezclado no es muy dependiente de la posición de inyección lo que indica que la turbulencia es tal que domina el mezclado con este flujo alto.



**Figura 23.** Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición de dos tapones abiertos ( $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{2}{3}$  del radio de la olla) a diferentes flujos de inyección de gas.

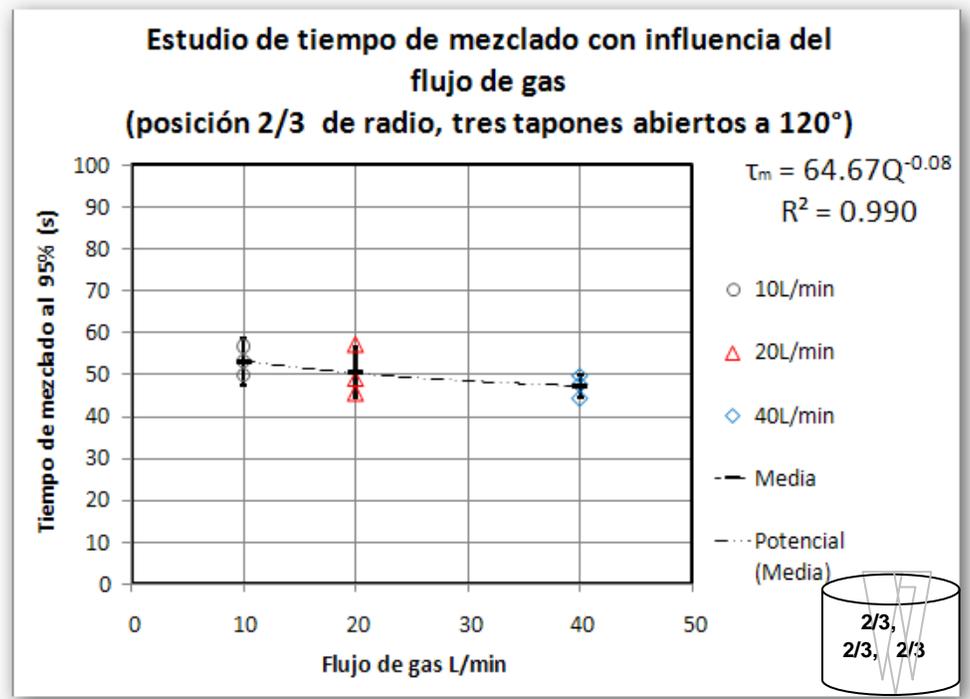
#### **4.2.3 Tres tapones abiertos y colocados a 120° uno del otro**

En la Figura 24 se observa el tiempo de mezclado respecto al flujo de gas inyectado con tres tapones abiertos a 120° uno del otro a 1/3 del radio de la olla. El mayor tiempo de mezclado medido es de  $84.77 \pm 3.10$  segundos con 10 L/min y el menor es de  $31.46 \pm 1.28$  segundos con 40 L/min; conservando la tendencia ya observada entre el tiempo de mezclado y el flujo de gas. El tiempo de mezclado a bajo flujo de gas (10 L/min) es mayor que el medido con dos tapones a 180° y 1/3 de radio; pero a flujo alto de gas (40 L/min) el tiempo de mezclado con 3 tapones es menor que con 2. Al inyectar con 3 tapones y el misma posición y flujo de gas que con 2 y un tapón, se mejora la distribución de la turbulencia, pero en cada tapón se inyecta menos gas por lo que la convección debe disminuir. Además, al inyectar con 3 tapones se crean 3 circuitos recirculatorios independientes y la transferencia de masa de un circuito a otro solo es posible por difusividad turbulenta y no por convección lo que explica que a bajo flujo de gas el tiempo de mezclado aumente considerablemente con 3 tapones respecto dos y sobre todo un tapón con las mismas condiciones de operación.



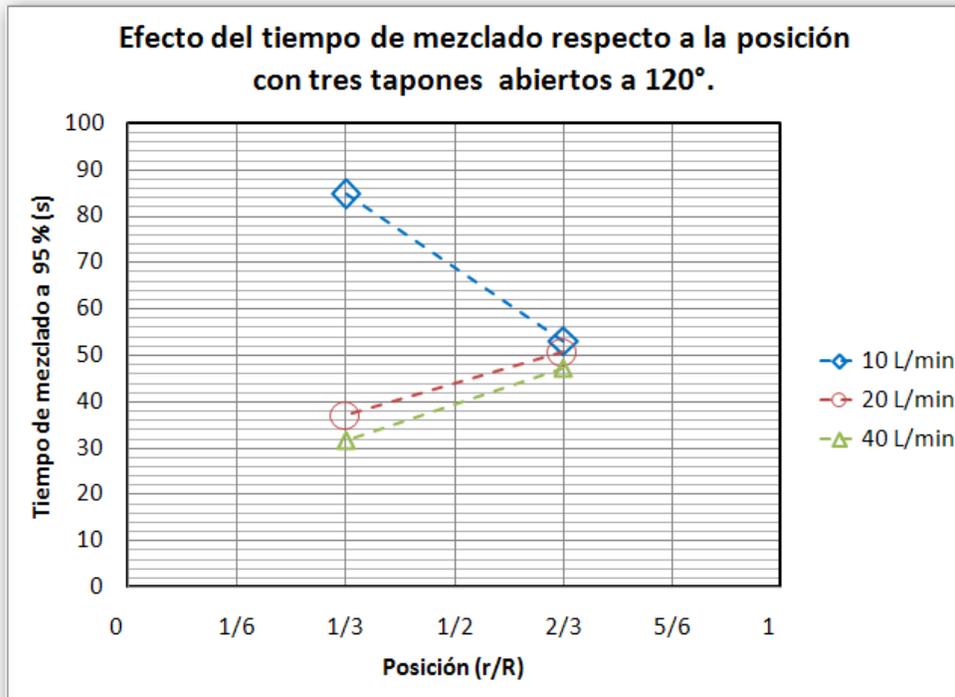
**Figura 24.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con tres tapones abiertos a 120°

La Figura 25 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado por tres tapones a 120° uno del otro a 2/3 del radio de la olla. El mayor tiempo de mezclado observado es de  $53.69 \pm 3.44$  segundos a 10 L/min y el menor siendo de  $47.24 \pm 2.85$  segundos a 40 L/min. El comportamiento de esta configuración de inyección de gas muestra que el tiempo de mezclado disminuye poco al aumentar el flujo de gas, esto es dado por la fricción que se genera entre la pluma de gas y la pared de la olla. Durante la experimentación fue observado que la base de apoyo del modelo físico vibraba en esta configuración, indicio de disipación de energía fuera de la olla.



**Figura 25.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con tres tapones abiertos a 120°

La Figura 26 muestra en forma condensada la dependencia del tiempo de mezclado respecto a la posición de inyección con tres tapones abiertos a 120° uno del otro para distintos flujos de gas. Se observa que a bajos flujos de gas el tiempo disminuye mientras la posición de inyección se aleja del centro de la olla; pero a altos flujos ocurre lo inverso, es decir, aumenta el tiempo de mezclado al inyectar desde 1/3 a 2/3 del radio. También se observa que con 20 y 40 L/min, el tiempo de mezclado no cambia en gran medida. A 1/3 del radio es muy notorio el efecto del flujo de gas con 3 tapones, pero a 2/3 del radio el efecto de flujo de gas sobre el mezclado es insignificante.

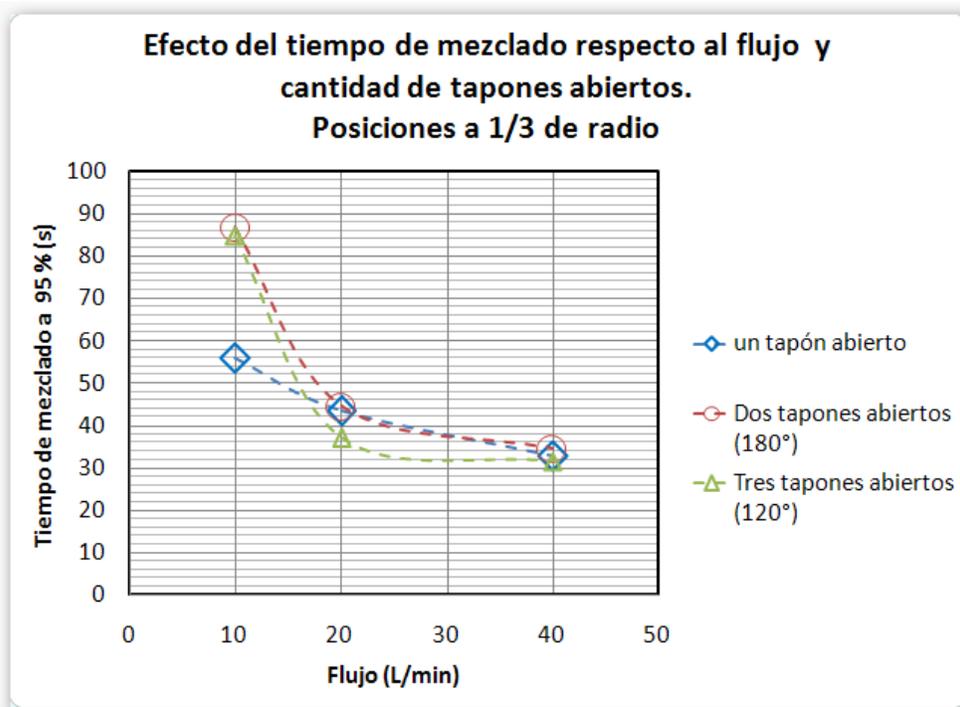


**Figura 26.** Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición de tres tapones abiertos (1/3 y 2/3 del radio de la olla) a diferentes flujos de inyección de gas.

### 4.3 INFLUENCIA DEL FLUJO DE GAS Y LA CANTIDAD DE TAPONES ABIERTOS

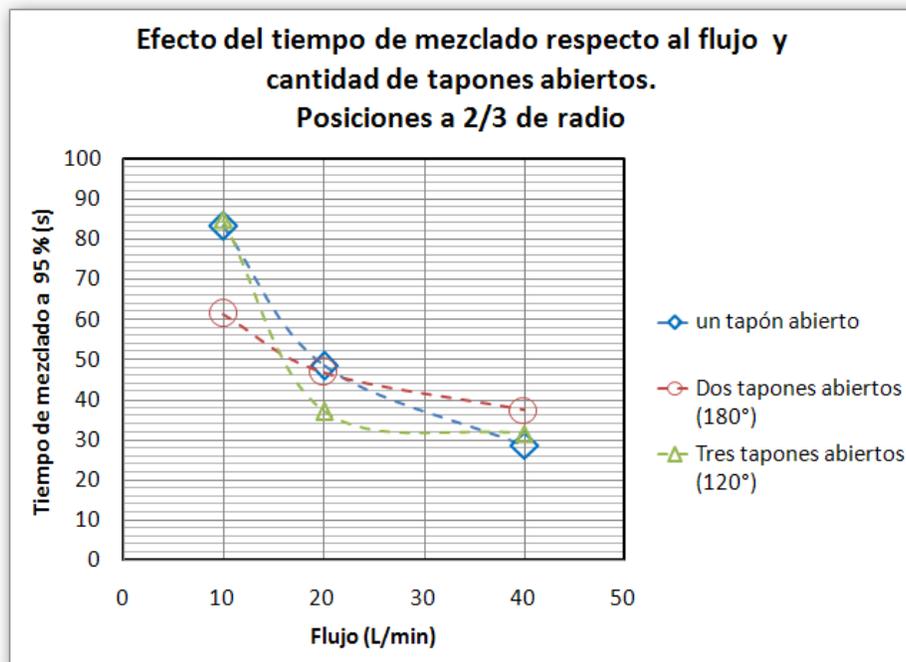
La Figura 27 muestra el tiempo de mezclado respecto al flujo de gas inyectado para distinta cantidad de tapones abiertos a 1/3 del radio de la olla. Sin importar la cantidad de tapones abiertos el tiempo tiene un comportamiento inverso al flujo de gas inyectado.

Para un tapón abierto en  $1/3$  de radio representa la mejor opción dado que a bajos flujos de gas se tiene el menor tiempo de mezclado, y a altos flujos la diferencia al tener más tapones abiertos no es muy relevante. Es claro que a flujo constante manteniendo la posición de inyección igual, poner más tapones no implica mejorar el mezclado. AL poner más tapones pero inyectar la misma cantidad de gas diluye el efecto convectivo del arrastre de gas sobre el líquido y además crea circuitos recirculatorios independientes que impiden el transporte de masa por convección de un circuito a otro aunque la turbulencia si se distribuye mejor en la olla con más tapones.



**Figura 27.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con 1, 2 y 3 tapones abiertos.

La Figura 28 muestra al tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado a  $2/3$  del radio de la olla, con diferente cantidad de tapones abiertos. Se observa que a 10 L/min el menor tiempo corresponde a 3 tapones abiertos, a 20 L/min el tiempo de mezclado es casi el mismo sin importar la cantidad de tapones abiertos y que a 40 L/min el menor tiempo de mezclado corresponde a un solo tapón abierto. Siendo recomendable el uso de un tapón abierto en esta posición; sin embargo, debido al efecto de la fricción observada entre la pluma de gas y la pared de la olla no es recomendable el uso de esta posición, siendo posible tener desgaste de refractario. También vuelve a quedar claro que al aumentar el número de tapones el efecto del flujo es menor sobre el mezclado, ya que las curvas con 2 y tres tapones son más horizontales, lo que indica una pérdida de dependencia entre el tiempo de mezclado y el flujo de gas conforme aumenta el número de tapones.



**Figura 28.** Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con 1, 2 y 3 tapones abiertos.

## Capítulo 5. CONCLUSIONES

- En todos los eventos evaluados la tendencia que se obtuvo fue la disminución del tiempo de mezclado ante el aumento de flujo de gas inyectado. La posición de inyección de 2/3 del radio con un solo tapón resultó la más sensible variando de  $83.25 \pm 4.55$  segundos con 10 L/min a  $28.68 \pm 2.79$  segundos con 40 L/min, mientras que la posición de inyección menos sensible es la de 2/3 con tres tapones abiertos a  $120^\circ$  uno del otro variando desde  $53.09 \pm 3.44$  a  $47.24 \pm 2.85$  segundos con 10 y 40 L/min respectivamente. Esto es ocasionado por el incremento de cantidad de burbujas en la pluma, que provocan el aumento de turbulencia, generando mayor convección y disipación turbulenta en el agua, y por ende menor tiempo de mezclado.
- Cuando el punto de inyección del gas se aleja del centro de la olla, se observa una disminución del tiempo de mezclado; pero al acercarse a las paredes de la olla es incrementado por el rozamiento dado entre las paredes y la pluma de gas (que se presentaría en la industria como desgaste de refractario).
- En el efecto de la cantidad de tapones abiertos se observa que entre los flujos de 20 y 40 L/min no hay gran diferencia en colocar más de un tapón, siendo la mejor opción el uso de un solo tapón. Al incrementar el número de tapones a flujo de gas constante se empeora el mezclado porque se crean un número igual de circuitos de circulación independientes que entorpecen el transporte de masa, ya que se disminuye la convección y la única manera de transportar

soluto de un circuito a otro es por turbulencia y no por convección, aunque se mejora la distribución turbulenta en la olla con más tapones. Cuando se inyecta con un tapón se crea un solo circuito de recirculación que abarca toda la olla y esto favorece el mezclado por convección.

- Las posiciones de inyección medias del radio de la olla representa la mejor posición de inyección para el mezclado con un solo tapón, mientras que los flujos de 20 L/min ( $1.764 \text{ m}^3/\text{min}$ ) son los óptimos para el mezclado, representando un ahorro en el volumen de gas inyectado con una pérdida de tiempo de mezclado insignificante respecto al flujo máximo de 40 L/min (no mayor a 10 segundos).
- Los peores mezclados resultantes fueron los siguientes: a)  $93.03 \pm 5$  segundos con un solo tapón en el centro de la olla a 10 L/min; b)  $83.25 \pm 4.55$  segundos con un tapón a  $2/3$  de radio de la olla a 10 L/min; c)  $86.85 \pm 6.02$  segundos con dos tapones abiertos con  $180^\circ$  uno de otro en  $1/3$  de radio de olla a 10 L/min; y d)  $84.77 \pm 3.10$  segundos con tres tapones abiertos  $120^\circ$  uno de otro en  $1/3$  de radio de la olla a 10 L/min. En los todos estos casos se tiene un pobre mezclado por distintos motivos: en la inyección excéntrica se disminuye el tiempo de mezclado por el rozamiento (disminuido al incrementar el flujo de gas inyectado, siendo nulificado a 40 L/min), mientras que en la inyección céntrica el mezclado es pobre por la presencia de zonas muertas (de poco movimiento) en el fondo de la olla. En todos los casos el flujo fue de 10 L/min por lo que hay pocas burbujas que arrastran pobremente al líquido provocando pobre convección y poca turbulencia.

## Índice de figuras.

	Página
Figura 1. Antigua fabricación de acero.....	9
Figura 2. Esquema general de proceso Bessemer.....	10
Figura 3. Esquema del proceso AOD y del insuflado de gas vía lateral.....	12
Figura 4. Esquema del proceso HO y del insuflado de gas por la parte inferior.....	13
Figura 5. Imagen de inyección céntrica de un modelo físico y de la inyección excéntrica del modelo físico.....	18
Figura 6. Influencia de diferentes tamaños de modelo físico en la medición del tiempo de mezclado.....	23
Figura 7. Concentración contra tiempo de mezclado en diferentes puntos de medición.....	23
Figura 8. Esquema de la zona de turbulencia formada por una burbuja del proceso de insuflado de gas.....	25
Figura 9. Zonas que caracterizan la distribución de burbujas en el baño líquido.....	26
Figura 10. Instalación de modelo físico y accesorios usados.....	29
Figura 11. Fotografía de ejemplo de funcionamiento de instalación durante una prueba de dos tapones a 1/3 del radio y con un flujo de 40 L/min.....	30
Figura 12. Esquema detallado de la instalación del modelo físico y accesorios.....	32
Figura 13. Esquema de posición de un, dos y tres tapones.....	38

Figura 14. Ejemplo de grafico concentración contra tiempo, usado para determinar el tiempo promedio de mezclado.....	46
Figura 15. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición central.....	48
Figura 16. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio.....	49
Figura 17. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un medio de radio.....	50
Figura 18. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercio de radio.....	51
Figura 19. Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición (central, 1/3, 1/2 y 2/3 del radio de la olla) a diferentes flujos de inyección de gas.....	52
Figura 20. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con dos tapones abiertos a 180°.....	53
Figura 21. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un medio de radio, con dos tapones abiertos a 180°.....	54
Figura 22. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con dos tapones abiertos a 180°.....	56
Figura 23. Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición de dos tapones abiertos (1/3, 1/2 y 2/3 del radio de la olla) a diferentes flujo de de inyección de gas.....	57
Figura 24. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con tres tapones abiertos a 120°.....	59
Figura 25. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con tres tapones abiertos a 120°.....	60
Figura 26. Tiempo de mezclado al 95%, respecto a la posición de tres tapones abiertos (1/3 y 2/3 del radio de la olla) a diferentes flujos de inyección de gas.....	61

Figura 27. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de un tercio de radio, con 1, 2 y 3 tapones abiertos..... 62

Figura 28. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas inyectado en la posición de dos tercios de radio, con 1, 2 y 3 tapones abiertos..... 63

## Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Datos de densidad , viscosidad estática y cinemática reportados.....	17
Tabla 2. Investigaciones principales en la determinación de correlación del tiempo de mezclado.....	21
Tabla 3. Datos de escalamiento dimensional del modelo físico.....	34
Tabla 4. Escalamiento dinámico usado.....	35
Tabla 5. Matriz de experimentos usada en el presente trabajo.....	37

## Abreviaturas y subíndices

BOF: Horno Básico de Oxígeno.  
AOD: Horno argón-oxígeno para desulfuración  
HO: Horno olla.  
.v: viscosidad cinemática.  
.ρ: densidad.  
.η: Viscosidad estática.  
.T<sub>m</sub>: tiempo de mezclado  
.ε<sub>m</sub>: Velocidad de disipación de energía.  
.λ: factor de escala geométrica.  
.pH: Potencial de hidrógeno.  
L: Altura de baño líquido.  
M: concentración molar.  
R: Radio de la olla.  
Q: Flujo de gas inyectado.  
C: concentración.  
.m<sup>3</sup>/min: metros cúbico por minuto.  
L/min: litros por minuto

### Subíndices

.m, mix: mezclado  
.g: gas  
.mod: de la olla real.  
.fs: del modelo físico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. - J.A. Gómez-Urquiza, Memorias del XXII simposio nacional de siderurgia, vol. 1, Michoacán, México, 2001, pág. 19-1 a 19-23.
- 2.- D. Mazumdar y R.I.L. Guthrie. *The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems* .ISIJ international, 1995, 35, 1, 1.
3. - F. Oeters. W. Plischkell, Steinmetz y H. Wilhelm. *Fluid flow and mixing in secondary metallurgy*. Steel Res. 1988, 59,192.
4. - P.E. Anagbo, J.K. Brimacombe y H. Wilhelm. *Plume characteristics and liquid circulation in gas injection through a porous plug*.Can. Metall. 1989, 28, 323.
- 5.- S.T. Johansen y T.A. Engh. Scandinavian Journal Metall. 1985, 12, 214.
6. - A. Alexiadis, P. Gardin y J. F. Domgin. *Spot Turbulence, Breakup, and Coalescence of Bubbles Released from a Porous Plug Injector into a Gas-Stirred Ladle*. Metall. Trans. B, 2004,35B, 949.
- 7.- A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe. *Measurement of physical characteristics of bubbles in gas-liquid plumes: Part I. An improved electro resistivity probe technique*. Metall. Trans B, 1987, 18B, 649.
- 8.-K.H. Tacke, H.G. Schubert, D.J. Weber y K. Schwerdtfeger. *Characteristics of round vertical gas bubble jets*. Metall. Trans, 1985, 16B, 263.
9. - G.G. Krishnmurthy, S.P. Mehrotra y A. Ghosh. *Experimental investigacion of mixing phenomena in a gas stirred liquid bath*. Metall. Trans B. 1988, 19B, 885.
- 10.- A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe. *Measurement of physical characteristics of bubbles in gas-liquid plumes: Part II. Local properties of turbulent air-water plumes in vertically injected jets* .Metal. Trans B. 1987, 18B, 659.
- 11.-C.T.Hsiao, T. Lehner y B. Kiellberg. .Scandinavian Journal Metall. 1980, 9, 105.
- 12.- Geankoplis C.J. Procesos de Transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. Compañía editorial continental. Mexico 1998. Pág. 167.
- 13.- M. Zhu, T Inomoto e I. Sawada. *.Fluid Flow and Mixing through Multi-Tuyere*. ISIJ international, 1995, 35, 5,472.

- 14.- M. A. Ramirez-Argaez, J. Tapia, J. Espinoza y E. Alcantar. *Modelación matemática del mezclado en hornos cucharas agitadas con gas*. Revista Metalurgia. 2006, 42, 56.
- 15.- K. Chattopadhyay, A. SenGupta, S.K. Lenka y V. Singh. *Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle: a water model study*. Iron making and steelmaking, 2009,36,7,537.
16. - S. Joo y R. I. L. Guthrie. *Modeling flows and mixing in steelmaking ladles designed for single and dual- plug bubbling operations*. Metall Trans B, 1992, 238B, 765-777.
17. - H. Turkoglu y B. Farouk. *Mixing time and liquid circulation rate in steelmaking ladles with vertical gas injection*. ISIJ international. 1991,31,1371.
18. - K. Nakanishi, T Fuji y J. Szekely. .Iron making and steelmaking. 1975, 3,193.
19. - D. Mazumdar y J.W. Evans. *Macroscopic Models for Gas Stirred Ladles*. ISIJ international, 2004, 44, 3, 447.
20. - D. Mazumdar, H.B Kim y R. I. L. Guthrie. *Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study*. Iron making and Steelmaking, 2000, 27, 4, 302-308.
- 21.- P.E. Anagbo y J.K. Brimacombe. *Plume characteristics and liquid circulation in gas injection trough a porous plug*. Metall. Trans B. 1990, 21B, 637.
- 22.- Orta Sánchez Israel. Tesis licenciatura: Construcción de un modelo físico de horno olla para la refinación secundaria de acero. Facultad de química. UNAM, 2008.
- 23.- Y. Takatsuka y M. Iguchi. *Effect of swirl motion on mixing time in wáter bath agitated by upward gas injection*. ISIJ Int, 2001, 41, (2), 124-127
24. - S. Asai. T. Okamoto, J. C. He e I. Muchi. *Mixing Time of Refining Vessels Stirred by Gas Injection*. Trans. Iron and Steel Inst. Japan. 1985, 23,43.
- 25.- D. Mazumdar y R.I.L. Guthrie. *Mixing models for gas stirred metallurgical reactors*. Metall. Trans B, 1986, 17B, 725.
- 26.- M. Neifer, S. Rodi y D. Sucker. *Investigations on the fluidymanic and thermal process control in ladles*. Steel Res. 1993, 64,54.

## **Páginas de internet**

27- <http://www.infoacero.cl/acero/parrabio.htm>, 17 de Febrero 2010.

28.- <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/>, 17 de Febrero 2010.

29.- [http://matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle\\_stirring/stirring\\_4.html](http://matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle_stirring/stirring_4.html)., 17 de Febrero 2010.

30.- <http://taninos.tripod.com/viscosidad.html>. 25 de Febrero 2010

31.- <http://www.ucm.es/info/Geofis/practicas/propiedades%20agua.pdf>. 25 de Febrero de 2010.

## APÉNDICE:

- \* Pluma: Área bifásica (gas-liquido) formada por la acción de inyección de gas, en el caso del OH, proveniente de una abertura llamada “tapón o boquilla” encontrada en la base.
- \*\* Concentración adimensional (C) : Relación entre la concentración instantánea y la concentración final, su cálculo es:

$$[\text{OH}^-] = 10^{-(14-\text{pH})} ; [\text{OH}^-] = 10^{-(14-\text{pH})}$$

Donde  $[\text{OH}^-]$  = concentración de iones hidróxido; pH = potencial de hidrogeno, medido durante la experimentación.

Se realizo el cálculo para valores de pH medidos cada segundo desde el final de inserción del trazador hasta 150 segundos. Cada valor es la concentración instantánea ( $C_i$ )

A 150 segundos se mide el valor que se denomina concentración final ( $C_f$ ).

La concentración adimensional se determina por:

$$C = \frac{C_i}{C_f}$$

- \*\*\* Exponente: Correspondiente al encontrado a la correlación dada entre el tiempo de mezclado y la variación de flujo.

$$\tau_m = Q^x$$

Donde  $\tau_m$  = tiempo de mezclado, Q es el flujo de gas, y x es el exponente.