



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

---

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

**MODELADO FÍSICO DE MEZCLADO EN OLLAS AGITADAS CON  
GAS EN PRESENCIA DE ESCORIA**

### **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

**PRESENTA**

**JORGE ARTURO GONZÁLEZ BELLO**



**MÉXICO, D.F.**

**2011**

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: Carlos González Rivera

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

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

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

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

**ASESOR DEL TEMA:** \_\_\_\_\_  
**DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ**

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

**SUSTENTANTE:** \_\_\_\_\_  
**JORGE ARTURO GONZÁLEZ BELLO**

Haz lo necesario para lograr tu más ardiente deseo, y acabarás lográndolo.

Ludwig Van Beethoven

Me apoderaré del destino agarrándolo por el cuello. No me dominará

Ludwig Van Beethoven

Quien tiene paciencia, obtendrá lo que desea

Benjamín Franklin

## **DEDICATORIAS**

**A MI MADRE: TU FUERZA Y CARÍÑO SIEMPRE ME ENVOLVIERON. GRACIAS POR NO PERDER LA FÉ**

**A MI PADRE: TU MANO, AUNQUE DURA, SIEMPRE ESTUVO AHÍ PARA CUANDO LA NECESITARA.**

**A MIS ASESORES Y AMIGOS: ADRIAN AMARO VILLEDA, MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ, AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO Y JUAN SOLÓRZANO. POR EL APOYO INCONDICIONAL, LAS INTERMINABLES PLÁTICAS Y LA GRAN AYUDA PROPORCIONADA. SON UN MODELO A SEGUIR**

**A MIS MEJORES AMIGOS:**

**VIRIDIANA: SIEMPRE LLEGAS EN EL MOMENTO ADECUADO Y HACES COSAS GRANDES**

**MIGUEL ANGEL: SI EN LAS COLADAS HACEMOS UN GRAN EQUIPO, ESPERO QUE EN LA VIDA SEA MEJOR**

**LUZ ELENA: SI LOS AMIGOS SON UN TESORO, TU ERES DE ORO PURO**

**ALINE: FUISTE DE GRAN AYUDA PARA MI FORMACIÓN, TUS PALABRAS ME IMPULSARON EN SU MOMENTO Y ME AYUDASTE HASTA EL FIN, INCLUSO PARA ESTE MISMO TRABAJO**

**MONICA: FUISTE DE GRAN AYUDA EN LA EXPERIMENTACIÓN**

**A TODOS MIS COMPAÑEROS: INFLUYERON EN MI FORMACIÓN Y LES AGRADEZCO LA COMPAÑÍA. SIGAN POR BUEN CAMINO**

**A LA UNAM POR HABERME PERMITIDO SER PARTE DE SUS FILAS**

## INDICE

	Página
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Desarrollo Histórico.....	6
1.2 Evolución de los elementos presentes en el acero.....	9
1.3 Principales productores de acero.....	11
1.4 Refinación secundaria del acero.....	15
1.5 Modelado Físico.....	17
1.6 Aspecto económico.....	17
<b>Capítulo 2. Revisión Bibliográfica.....</b>	<b>18</b>
2.1 Revisión Bibliográfica y fenomenología del proceso.....	18
<b>Hipótesis.....</b>	<b>27</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo 3. Metodología de Trabajo.....</b>	<b>28</b>
3.1 Instalación del Modelo Físico.....	28
3.2 Pruebas Preliminares.....	31
3.3 Condiciones de Operación.....	32
3.4 Diseño Experimental.....	34
3.5 Protocolo de Experimentación.....	35
3.5.1 Montaje y Desmontaje.....	36
3.5.2 Proceso Experimental.....	37
3.5.3 Tratamiento de datos.....	38

<b>Capítulo 4. Resultados y Análisis.....</b>	<b>38</b>
4.1 Ejemplo de la determinación de tiempo de mezclado.....	38
4.2 Influencia del flujo de gas y la posición de inyección.....	40
4.2.1 Un tapón abierto.....	40
4.2.2 Dos tapones abiertos a 180° uno del otro.....	51
4.2.3 Tres tapones abiertos a 120° uno del otro.....	59
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>66</b>
<b>Indice de figuras.....</b>	<b>67</b>
<b>Indice de tablas.....</b>	<b>70</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>71</b>

# Capítulo 1. Introducción

El acero es uno de los elementos de construcción moderna más eficientes, porque ofrece la mayor relación resistencia-peso entre cualquier material convencional y es excepcionalmente durable.

Actualmente se usan alrededor de 20 mil millones de toneladas de acero en una extensa variedad de productos.

El acero puede ser infinitamente reciclable, permitiendo la creación de nuevos productos sin tener pérdidas de resistencia, maquinabilidad o de cualquier otra medida, ni de rendimiento, esto es una de las principales características para su selección en la construcción y manufactura en todo el mundo.<sup>1</sup>

Nuevas tecnologías en aceros de alto rendimiento, les permiten a los productores de automóviles hacer vehículos que sean más ligeros y eficientes energéticamente, además, el acero ofrece ventajas en la construcción de turbinas de viento debido a su resistencia y durabilidad. El impacto ambiental es minimizado pues el reciclaje del acero es menos contaminante. La resistencia del mismo, también provoca que los diseñadores usen menos material sin comprometer la resistencia estructural además de promover el ahorro de energía.

## 1.1 Desarrollo histórico

Desde la antigüedad se ha manejado al hierro. Primeramente, sólo se obtenía este metal de los meteoros o como subproducto de la obtención de bronce. Eventualmente se fueron ideando procesos y perfeccionando técnicas hasta que se pudo obtener hierro como objetivo primario.<sup>1</sup>

La historia del acero comienza en el siglo XIX con Reaumur en Francia en 1772, quien mostró la posibilidad de transformar la fundición de acero mediante la simple adición de hierro metálico o de chatarra oxidada, además de descubrir cómo



convertir el hierro forjado en acero. Después Kelly en E.U. en 1850 hizo estudios para producir acero insuflando aire a través de hierro líquido para reducir el contenido de carbono disuelto. Sus estudios mostraron que el aire no enfriaba el hierro líquido, sino que propiciaba una combustión violenta y mejoraba la calidad del arrabio convirtiéndolo en acero. Pero el gran avance en la aceración lo incorporó Bessemer en Reino Unido en 1856 a través del convertidor ácido que fue bautizado con su nombre. En el marco de la revolución industrial, Bessemer implementó un mejor proceso de aceración el cual multiplicó la producción de acero con lo que satisfizo las demandas que requerían los motores a vapor, máquinas y vías de ferrocarril. La Tabla 1 presenta cronológicamente la evolución de la siderurgia, resaltando las aportaciones que han impactado a esta industria.

<b>4000 AC</b>	Hierro accidental, meteoritos. Subproducto del bronce
<b>2500 AC</b>	Reducción directa
- 500	Hornos pequeños, producción de pequeñas piezas de forja
- 400	Piezas parcialmente descarburizadas: Acero Noricum
100	Descubrimiento del hierro colado en China
1100	Hierro aparece en Galia Invención del martillo
<b>1300</b>	Hierro Colado
1300	Hornos grandes, producción de arrabios, refundidos y refinados con aire
1550	Invención de toberas impulsadas por agua
1760	Distribución impresa del conocimiento (ej. De Re Metallica)
1784	Sustitución de carbon por carbón mineral. Invención de la olla
<b>1850</b>	Metalurgia moderna
1856	Convertidor Bessemer
1865	Siemens Martin (horno de reverbero)
1877	Thomas (proceso Bessemer básico)
1900	Producción de acero por convertidores sustituye hierros colados
1950	Convertidor de oxígeno
<b>1930</b>	Aceración eléctrica

Tabla 1. Evolución histórica de la siderurgia<sup>1</sup>

El convertidor Bessemer permitía fabricar un acero con muy pocas impurezas (para la época) con el cual no se necesitaba combustible extra, pues se insuflaba aire frío al arrabio líquido para oxidar carbono que, al reaccionar, producía una cantidad de calor suficiente para mantener líquido al baño e incluso sobrecalentarlo (ver Figura 1).

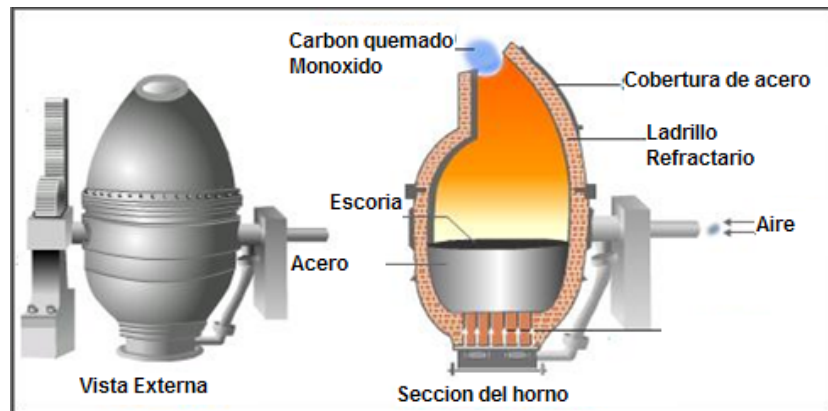


Figura 1. Esquema del convertidor Bessemer

Los procesos de producción de acero fueron evolucionando, produciendo cada vez acero de mejor calidad y en menor tiempo o incrementando la productividad. Desde el descubrimiento del proceso del convertidor básico de Thomas, pasando por la aceración con modernos convertidores básicos que soplan oxígeno puro (BOF) hasta llegar a la aceración con hornos de arco eléctrico (HAE).

Actualmente se tienen dos rutas para la producción del acero, la ruta integrada y la ruta no integrada, que independientemente del proceso de aceración se emplea el Horno Olla para realizar la refinación secundaria y producir un acero de alta calidad cumpliendo especificaciones de composición química y libre de impurezas no metálicas (inclusiones) y de elementos residuales nocivos para las propiedades mecánicas del acero (S, O, H, N, etc.). Este acero líquido de alta calidad está listo para ser colado y solidificado en productivas máquinas de colada continua en donde se obtienen palanquillas, planchones, planchones delgados, tochos, etc., a los cuales se les deforma plásticamente en molinos de laminación para obtener productos semiterminados como alambrón, perfiles, láminas, varillas, etc. (Ver Figura 2).

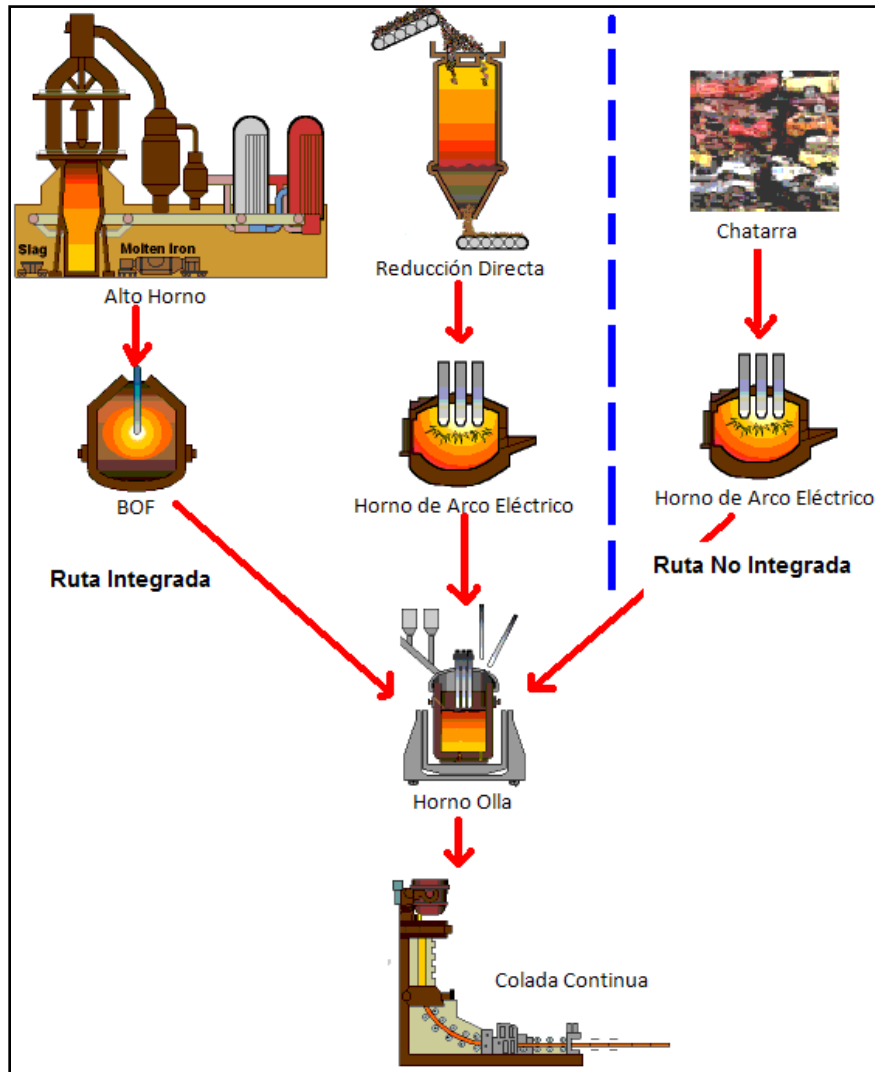


Figura 2. Rutas de producción de acero

## 1.2 Evolución de la limpieza elementos residuales presentes en el acero

Como los procesos de producción de acero cada vez son más eficientes, se obtiene acero de mejor calidad con menor grado de impurezas.

Los elementos residuales dañinos para la resistencia mecánica del acero son el P, S, N y O por lo que se busca que estos elementos estén presentes en un contenido pequeño o residual. También se ha logrado que el contenido de C en el acero disminuya. En la Figura 3 se aprecia la evolución que se ha logrado en los

aceros fabricados disminuyendo el contenido final de elementos residuales aunque desde la década de los 80 no se aprecian mayores disminuciones.

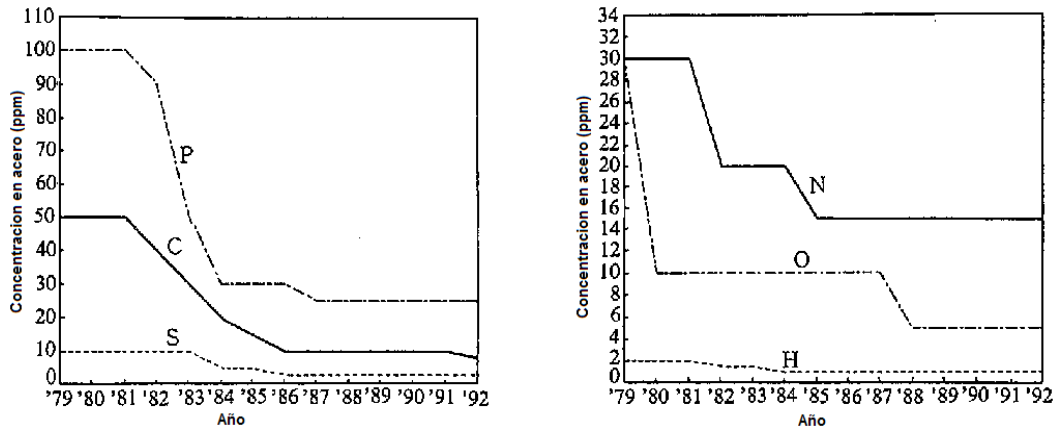


Figura 3. Disminución de los elementos presentes en el acero con respecto al tiempo.<sup>2</sup>

Como las aplicaciones de los aceros son cada vez más específicas, se debe controlar adecuadamente la composición química del acero según sea el uso al que va a ser sometido y por lo tanto se deben disminuir los contenidos de elementos residuales como C, P, O, etc. En la Figura 4 se observa como ha disminuido el contenido final de los elementos residuales, mostrando también una proyección a futuro no muy lejano.

Contenido \ Año	1960	1980	2000	Futuro
Carbono	250	150	20	10
Fósforo	300	150	100 (50)	30
Azufre	300	30	10	10
Nitrógeno	150	70	30	20
Oxígeno Total	30	30	15	10
Hidrógeno	6	6	1	1
<b>Cantidad Total</b>	<b>1036</b>	<b>436</b>	<b>176 (126)</b>	<b>81</b>

Figura 4. Evolución de los contenidos del acero en ppm.<sup>2</sup>

### 1.3 Principales productores de acero

La producción mundial de acero para los 64 países que conforman la Asociación Mundial del Acero (Worldsteel) en febrero del 2011 fue de 117 millones de toneladas métricas (mmt), lo cual es un 8.8% mayor que los resultados obtenidos en febrero del 2010. En la Figura 5 se muestra una gráfica mostrando la producción mundial de acero, la producción de acero que ha tenido China y la producción de acero reportada por el resto del mundo (ROW) desde septiembre de 2009 hasta febrero de 2011.

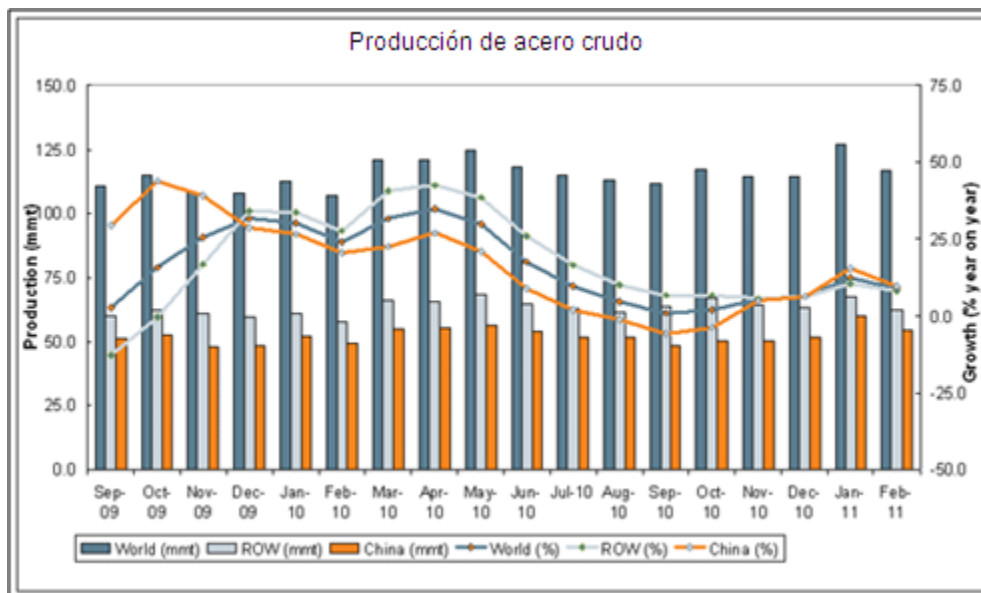


Figura 5. Producción mundial de acero (mmt).<sup>18</sup>

En general las 170 empresas productoras de acero que conforman Worldsteel, tuvieron un aumento en su producción de acero, debido a que es cada vez más usado a nivel mundial en diferentes ámbitos. La capacidad de utilización del acero en el mundo ha incrementado un total de 1.9% (para llegar a un 82%) desde febrero del 2010 hasta febrero del 2011 como se muestra en la Figura 6.

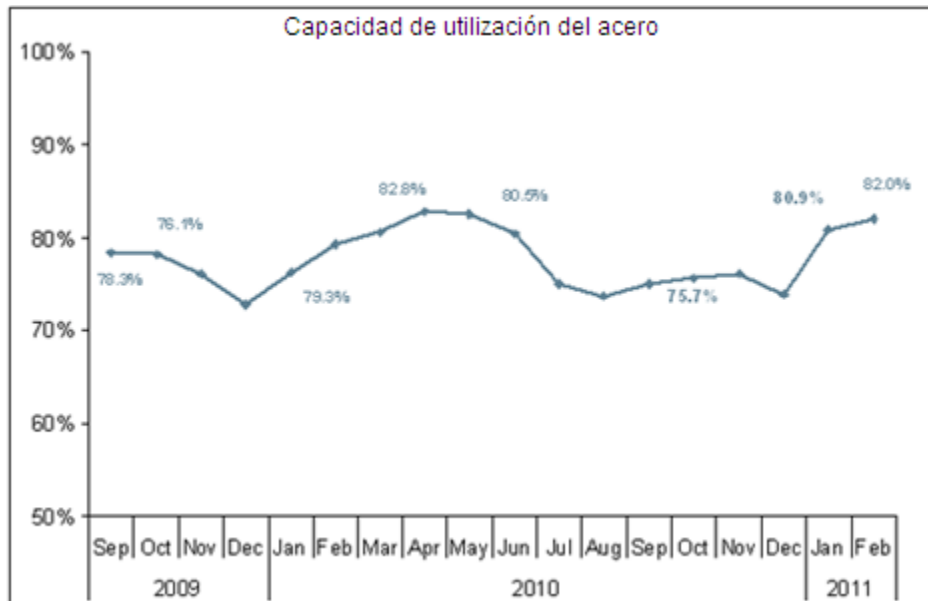


Figura 6. Capacidad de utilización del acero en el mundo.<sup>18</sup>

En el mundo, China se sitúa como principal productor de acero, seguido por Japón, Estados Unidos y Rusia. México se encuentra en la posición 13 en el ranking mundial con una producción de 17 millones de toneladas métricas (mmt) (ver Figuras 7 y 8).

Con respecto a las compañías el liderazgo lo tiene ArcelorMittal con 77 mmt, seguido por BaoSteel. AHMSA se localiza en el número 48 del ranking mundial con apenas 3 mmt (ver Figura 9).

million metric tons (preliminary data)								
Rank	2010 P	2009	2008	2007	2006	2005	%2010/2009	
1	China	626.7	573.6	500.3	489.3	419.1	353.2	9.3
2	Japan	109.6	87.5	118.7	120.2	116.2	112.5	25.2
3	United States	80.6	58.2	91.4	98.1	98.6	94.9	38.5
4	Russia	67.0	60.0	68.5	72.4	70.8	66.1	11.7
5	India	66.8	62.8	57.8	53.5	49.5	45.8	6.4
6	South Korea	58.5	48.6	53.6	51.5	48.5	47.8	20.3
7	Germany	43.8	32.7	45.8	48.6	47.2	44.5	34.1
8	Ukraine	33.6	29.9	37.3	42.8	40.9	38.6	12.4
9	Brazil	32.8	26.5	33.7	33.8	30.9	31.6	23.8
10	Turkey	29.0	25.3	26.8	25.8	23.3	21.0	14.6
11	Italy	25.8	19.8	30.6	31.6	31.6	29.3	29.7
12	Taiwan, China	19.6	15.9	19.9	20.9	20.0	18.9	23.7
13	Mexico	17.0	14.0	17.2	17.6	16.4	16.2	22.1
14	Spain	16.3	14.4	18.6	19.0	18.4	17.8	13.6
15	France	15.4	12.8	17.9	19.2	19.9	19.5	20.1
16	Canada	13.0	9.3	14.8	15.6	15.5	15.3	39.9
17	Iran	12.0	10.9	10.0	10.1	9.8	9.4	10.0
18	United Kingdom	9.7	10.1	13.5	14.3	13.9	13.2	-3.7
19	South Africa	8.5	7.5	8.3	9.1	9.7	9.5	13.3
20	Belgium	8.1	5.6	10.7	10.7	11.6	10.4	43.5
21	Poland	8.0	7.1	9.7	10.6	10.0	8.3	12.3
22	Australia	7.3	5.2	7.6	7.9	7.9	7.8	39.0
23	Austria	7.2	5.7	7.6	7.6	7.1	7.0	27.3
24	Egypt	6.7	5.5	6.2	6.2	6.0	5.6	20.5
25	Netherlands	6.7	5.2	6.9	7.4	6.4	6.9	28.1
26	Czech Republic	5.2	4.6	6.4	7.1	6.9	6.2	12.8
27	Argentina	5.1	4.0	5.5	5.4	5.5	5.4	28.0
28	Saudi Arabia	5.0	4.7	4.7	4.6	4.0	4.2	6.9
29	Sweden	4.8	2.8	5.2	5.7	5.5	5.7	72.8
30	Slovakia	4.6	3.7	4.5	5.1	5.1	4.5	22.5
31	Kazakhstan	4.3	4.1	4.3	4.8	4.3	4.5	4.1
32	Malaysia (e)	4.1	4.0	6.4	6.9	5.8	5.3	2.4
33	Finland	4.0	3.1	4.4	4.4	5.1	4.7	31.2
34	Romania	3.9	2.8	5.0	6.3	6.3	6.3	41.1
35	Thailand (e)	3.7	3.6	5.2	5.6	4.9	5.2	0.1
36	Indonesia (e)	3.6	3.5	3.9	4.2	3.8	3.7	2.8
37	Viet Nam	2.7	2.7	2.3	2.0	1.9	0.9	0.0
38	Luxembourg	2.6	2.1	2.6	2.9	2.8	2.2	19.7
39	Byelorussia	2.5	2.4	2.6	2.4	2.3	2.0	5.5
40	Venezuela	2.2	3.8	4.2	5.0	4.9	4.9	-41.2
	Others	25.6	23.3	26.6	30.3	29.0	27.1	
	World	1 413.6	1 229.4	1 327.2	1 346.1	1 247.2	1 144.1	15.0

Figura 7. Principales países productores de acero en el mundo de acuerdo a Worldsteel.<sup>18</sup>

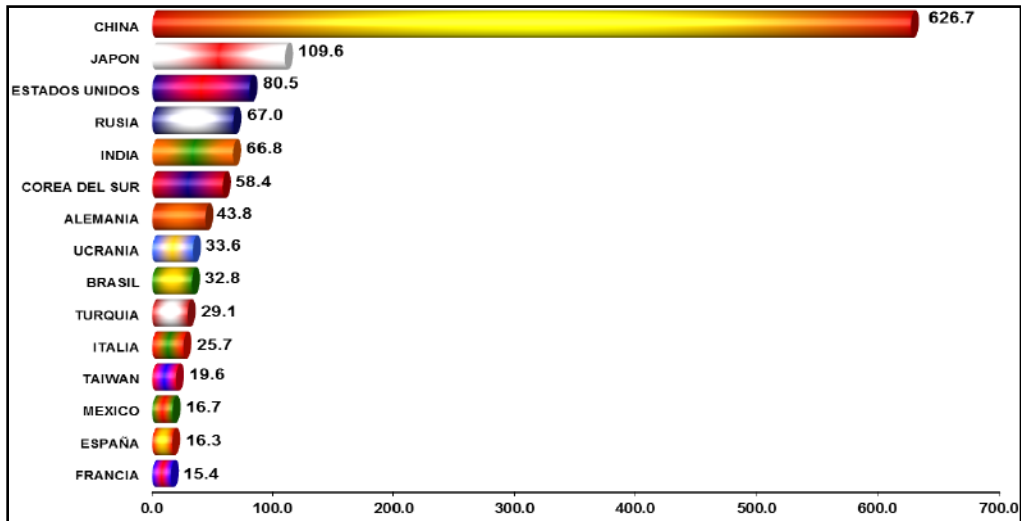


Figura 8. Principales países productores de acero en el mundo de acuerdo a CANACERO (mmt).<sup>20</sup>

Rank	Company	mmt	Rank	Company	mmt
1	ArcelorMittal	77.5	26	Hyundai	8.4
2	Baosteel	31.3	27	CELSA	7.8
3	POSCO	31.1	28	Metinvest	7.4
4	Nippon Steel <sup>(1)</sup>	26.5	29	Techint	6.9
5	JFE	25.8	30	Erdemir	6.5
6	Jiangsu Shagang <sup>(2)</sup>	20.5	31	Metalloinvest	6.5
7	Tata Steel <sup>(3)</sup>	20.5	32	Kobe	5.9
8	Ansteel	20.1	33	Usiminas	5.6
9	Severstal	16.7	34	JSW	5.5
10	Evrz	15.3	35	Essar	5.5
11	U.S. Steel	15.2	36	voestalpine <sup>(7)</sup>	5.5
12	Shougang <sup>(4)</sup>	15.1	37	Salzgitter <sup>(5)</sup>	4.9
13	Gerdau	14.2	38	Hadeed	4.8
14	Nucor	14.0	39	BlueScope	4.6
15	Wuhan	13.7	40	CSN	4.4
16	SAIL	13.5	41	Ezz	3.9
17	Handan	12.0	42	SSAB	3.6
18	Riva	11.3	43	Sidor	3.1
19	Sumitomo	11.0	44	Duferco	3.1
20	ThyssenKrupp <sup>(5)</sup>	11.0	45	Nisshin	3.1
21	Novolipetsk <sup>(6)</sup>	10.9	46	Vizag	3.0
22	IMIDRO	10.6	47	CMC	3.0
23	Magnitogorsk	9.6	48	AHMSA	3.0
24	China Steel	8.9	49	Dongkuk	3.0
25	Laiwu	8.9			

Figura 9. Principales empresas productoras de acero en el mundo.<sup>18</sup>



En México, la industria siderúrgica genera alrededor de 53 000 empleos directos y 550 000 empleos indirectos. Esto constituye un 2.6% del producto interno bruto nacional, lo que representa una cantidad de \$ 324 624 millones de pesos. Durante 2010 la producción mundial de acero alcanzó 1,412.8 millones de toneladas. México ocupó la posición 13 a nivel mundial (1.2% del total) y la 2ª de América Latina (27.1% del total regional). En la Figura 10 se muestra la presencia geográfica del acero en el territorio mexicano con los nombres de las respectivas empresas.

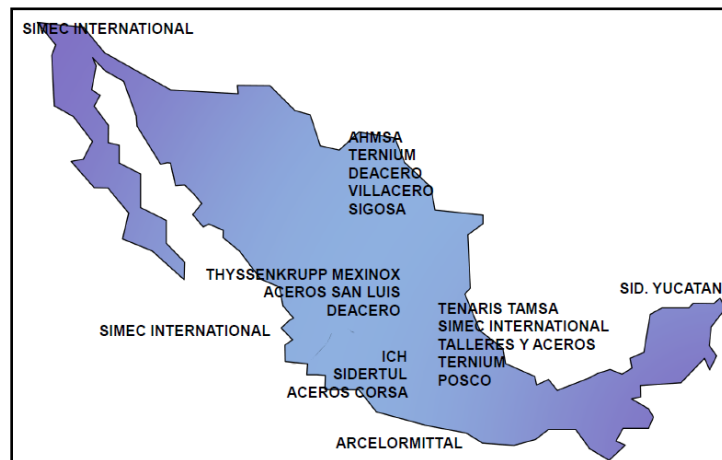


Figura 10. Presencia geográfica del acero en México.<sup>20</sup>

#### 1.4 Refinación secundaria del acero

Como se mencionó anteriormente, ambas rutas de producción de acero (Ruta Integrada y Ruta No Integrada) culminan invariablemente en el Horno Olla para realizar su refinación secundaria y producir un acero de alta calidad que cumpla con las especificaciones requeridas. Dicha refinación secundaria tiene como objetivo homogeneizar la temperatura del acero líquido, la composición final, eliminar impurezas no metálicas (inclusiones) y reducir elementos indeseables que afectan las propiedades mecánicas del acero (S, H, N, O, etc.).

La refinación secundaria requiere casi en su totalidad de una agitación adecuada del acero líquido para acelerarla. Se requiere, además, usar los respectivos aditivos (agentes desulfurantes, desoxidantes, escorificantes y elementos aleantes) para llevar a cabo el tratamiento del acero líquido correspondiente.

Comúnmente la agitación se lleva a cabo debido a la inyección de gas Argón por el fondo de la Olla a través de tapones fabricados especialmente con este propósito.

El mecanismo de agitación se lleva a cabo debido a fuerzas de arrastre o fricción, generadas por el ascenso de una burbuja a través del líquido. La fuerza ascendente se debe a la diferencia de densidad de ambos fluidos, y se denomina fuerza boyante.

Para este trabajo se simula un proceso de inyección de argón por la base del horno olla mostrado en la Figura 11.

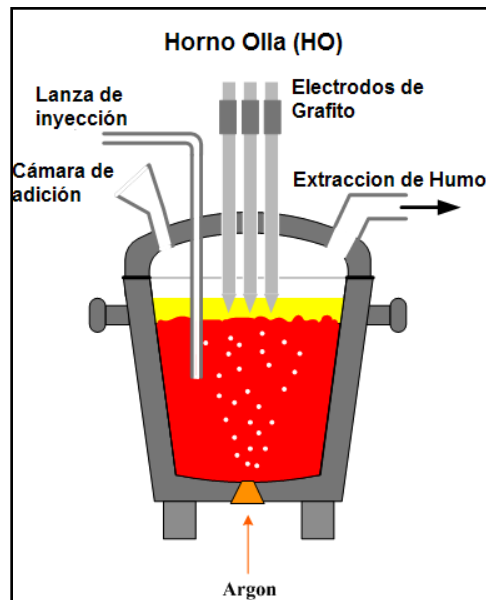


Figura 11. Esquema del Horno Olla con inyección de gas por el fondo

Las ventajas de realizar este tratamiento al acero líquido son:

- Desoxidación
- Desulfuración
- Descarburización
- Eliminación de inclusiones no metálicas
- Adición de elementos aleantes
- Homogeneización química
- Homogeneización térmica

## **1.5 Modelado Físico**

Debido a las condiciones de trabajo bajo las que se lleva a cabo el proceso de refinación secundaria del acero en el Horno Olla, como las temperaturas iguales o superiores a 1600°C, la opacidad del metal y escoria fundida, además el brillo del material, resulta extremadamente difícil o incluso imposible medir los parámetros que caracterizan al proceso (tiempo de mezclado y patrones de flujo del fluido) sin afectar la composición química del acero o comprometer gravemente la seguridad del investigador; es por esto que se recurre al modelado físico y/o matemático del proceso para poder entender o incluso predecir los fenómenos que se llevan a cabo en el sistema.

Un modelo físico es una representación a escala del sistema a estudiar usando otros materiales. Dicho modelo debe cumplir rigurosamente con estrictos criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática para los fenómenos que se llevan a cabo en el proceso real, en este caso la agitación o el flujo de fluidos. Además, debe ser más simple la observación y la medición.

En el estudio de la refinación secundaria se han realizado diversos modelos físicos reportados en la literatura especializada (que se detallan en la revisión bibliográfica) los cuales han aportado beneficios en los procesos reales, sin embargo, aún no se abarcan muchos fenómenos pues son muy complejos para su simulación.

## **1.6 Aspecto económico**

Como ya se mencionó anteriormente la industria siderúrgica genera alrededor de 53 000 empleos directos y 550 000 empleos indirectos en México, constituyendo así, un 2.6% del producto interno bruto nacional, lo que representa una cantidad de \$ 324 624 millones de pesos.

Además es el primer consumidor de electricidad, de gas natural y es de los principales usuarios del transporte de carga.

De 2007 a 2010, se dio inicio a un nuevo plan de inversiones por 5 mil 008 millones de dólares, donde se reconfiguró el sector con la fusión de importantes empresas globales y se crearon nuevas plantas productoras de acero.

La reducción de costos, derivada de la puesta en marcha de nuevos procesos y tecnologías intensivas en capital, según la CANACERO<sup>18</sup>, permitió que importantes empresas del sector obtuvieran certificaciones ISO 9000, avalándolos como proveedores confiables con mayor acceso al mercado internacional.

## **Capítulo 2. Revisión Bibliográfica**

### **2.1 Revisión bibliográfica y fenomenología del proceso**

En el campo de estudio fundamental del proceso del Horno Olla, se tienen diferentes investigaciones, las cuales se clasifican en tres tipos:

- Estudios a través del modelado físico
- Estudios a través del modelado matemático
- Estudios a través de una combinación de ambos modelados

Los parámetros o variables de operación que se deben evaluar en este proceso son: flujo de gas, cantidad de líquido, dimensiones de la olla, cantidad y posición de los tapones, grosor y tipo de escoria. En cuanto a los parámetros estudiados se refieren a: patrones de flujo, el tiempo de mezclado químico, interacciones acero-escoria usando agua-aceite, el mezclado térmico y la transferencia de masa.

El modelado físico es una herramienta muy importante para un ingeniero de procesos, siempre que cumpla rigurosamente con los criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática de un proceso.

Los modelos físicos reportados se hacen comúnmente usando el sistema agua-aire, aunque esto no es muy representativo debido a que en la realidad se tienen 3 fases (agua-aceite-aire) y no 2 (agua-aire). Los fenómenos principales para

analizar son: el comportamiento fluidinámico y las interacciones entre las fases del sistema gas-líquido-aceite.

Para hacer funcional al modelo físico se realiza la selección de los materiales mediante las propiedades que gobiernan los fenómenos a estudiar en el proceso. En 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).

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

En la Tabla 2 se muestra la similitud cinemática entre el agua a temperatura ambiente y el acero a 1600°C, ya que ambos fluidos poseen la misma viscosidad cinemática ( $v$ ), la cual se refiere al comportamiento del líquido mientras fluye.

	Densidad ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad estática ( $\eta$ , Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática ( $v$ , m <sup>2</sup> /s)
Agua a 20°C	998.2	0.001	1 x 10 <sup>-6</sup>
Acero a 1600°C	7000	0.0068	0.97 x 10 <sup>-6</sup>
Escoria*	3150	0.0085	2.7 x 10 <sup>-6</sup>
Aceite Q.S. Alto Kilometraje SAE 25 W 50	890	0.00191	2.15 x 10 <sup>-6</sup>

Tabla 2. Datos de densidad y viscosidad reportados

\*La viscosidad de la escoria depende enteramente de la composición química de la misma (contenido de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc)

Brimacombe y colaboradores <sup>3</sup> caracterizaron la estructura de la zona bifásica con la ayuda de modelos físicos de una olla con dos fases (líquido-gas). La zona bifásica se divide en cuatro regiones diferentes: la burbuja primaria, burbuja libre, pluma y el chorro. De estas regiones, la pluma es caracterizada por burbujas esféricas en una mezcla de agua-aire y ocupa la mayor parte del baño acuoso. El chorro ocupa alrededor de 3 o 4 % de la profundidad del baño en el equilibrio. En la Figura 12, se muestran las 4 zonas de distribución de las burbujas presentes en baño líquido.

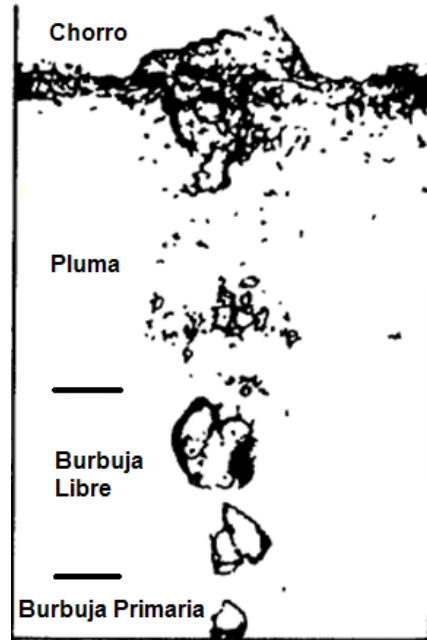


Figura 12. Zonas que caracterizan la distribución de burbujas en el baño líquido.<sup>3</sup>

Sin embargo, para que el modelo físico simule más realísticamente a una olla industrial que incluya la presencia de escoria, se debe añadir otra fase encima del baño inmiscible, la cual debe tener menor densidad. Cuando se lleva a cabo la agitación se presenta una abertura en la fase escoria conocida como “El Ojo”, cuya su formación se debe a que la salida de gas por la superficie libre desplaza la capa superior de escoria hacia las paredes (ver las Figuras 13, 14 y 15).

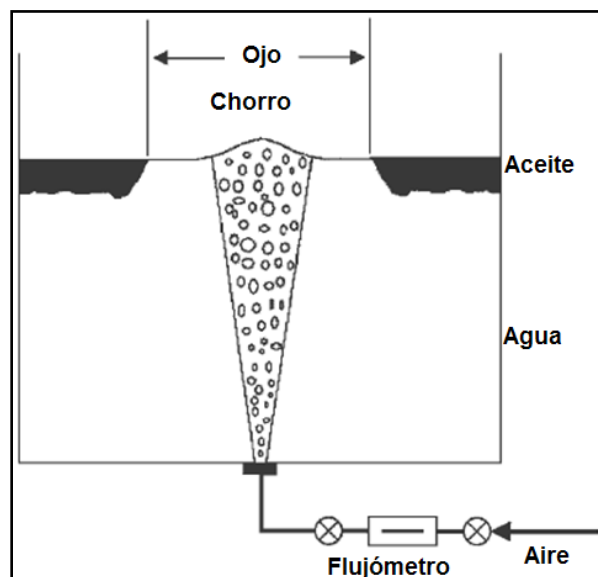


Figura 13. Esquema usado para simular el mezclado en presencia de escoria<sup>3, 6, 7</sup>

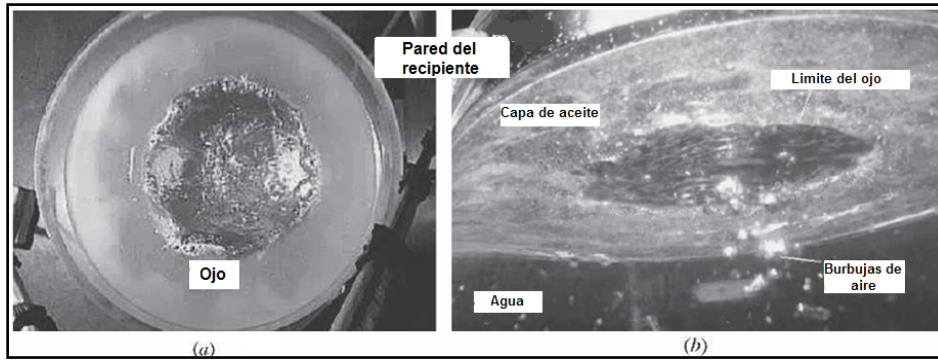


Figura 14. Vista superior (a) y vista lateral (b) del ojo en un modelo de agua-aceite<sup>3, 6, 7</sup>

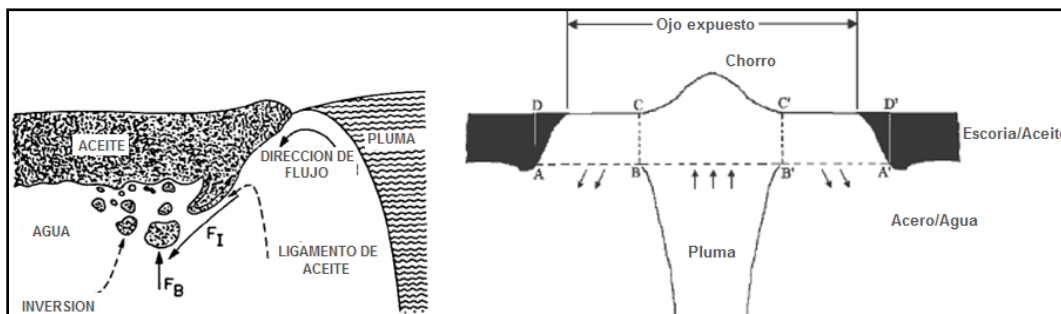


Figura 15. Esquema de las interacciones entre la pluma y la fase superior del líquido y formación del ojo en el baño líquido<sup>6, 7</sup>

Se han realizado numerosos experimentos respecto al grado de agitación que presentan las ollas de acero<sup>3,4</sup>, pues el mezclado es en un tema sumamente importante en estos reactores, ya que la productividad del proceso depende de la cinética de desoxidación, de desulfuración, de intercambios metal-escoria, de uniformidad química y térmica, así como de la eliminación de inclusiones, que a su vez dependen del grado de agitación o de mezclado. Para medir cuantitativamente al mezclado se emplea el concepto de tiempo de mezclado, que se define como el tiempo requerido para alcanzar un cierto nivel de uniformidad química de un trazador dentro del baño (criterio de mezclado) cuando inicialmente se inyecta éste en un punto. Para cuantificar el tiempo de mezclado se usan técnicas de pH, partículas suspendidas, colorimetría y conductividad eléctrica para medir la evolución con el tiempo de la concentración de un trazador que inicialmente es inyectado en un punto dentro de la olla. En la Tabla 3 se muestran diversos los grupos de investigación que han estudiado el mezclado en ollas a través de

modelos físicos, las técnicas de determinación del mezclado, el criterio de mezclado, las dimensiones de la olla, los flujos de gas y sobre todo las correlaciones empíricas que reportan del tiempo mezclado en función de las variables de proceso.

Investigadores	Tec. Exp.	Criterio de Mezclado	Dimensiones y masa del fluido	Flujo de gas (m <sup>3</sup> /min/T)	Correlación de tiempo de mezclado
Nakanishi <i>et al.</i> <sup>47)</sup>	pH	Undefined	$L=0.465$ m, $D=0.42$ m; 64 kg	0.015 to 0.06	$\tau_m = 800 \varepsilon_m^{-0.4}$
Asai <i>et al.</i> <sup>49)</sup>	Conductividad eléctrica	99%	$D=0.405$ , 0.2 & 0.10; $L/D=0.5$ to 1; 52 kg (max) & 0.4 kg (min)	Numerous; say, 0.019 to 0.90 with ref. to $D=0.405$ m & $L=0.40$ m	$\tau_m = 274 \varepsilon_m^{-0.33} L^{-1} R^{1.36}$
Sinha & McNellan <sup>58)</sup>	pH	97.7%	$L=0.48$ m, $D=0.45$ m; 76 kg	0.02 to 0.4	$\tau_m = 692 \varepsilon_m^{-0.89}$
Themelis and Stapurewicz <sup>53)</sup>	Fotocelda	95%	$L=0.67$ to 1.0 m, $D=0.66$ m; 310 kg (max)	0.13 to 0.96	$\tau_m = 164 \varepsilon_m^{-0.39} L^{0.39}$
Mietz and Oeters <sup>52)</sup>	Conductividad eléctrica y colorimetría	95%	$L=1.0$ m, $D=0.63$ m; 311 kg	0.038 to 0.29	$\tau_m = C_1 Q_g^{-n}$ $C_1$ and $n$ are functions of tracer addition and monitoring locations
Mazumdar and Guthrie <sup>56)</sup>	Conductividad eléctrica	95%	$L=0.5$ to 1.1 m, $D=1.12$ m; 1000 kg	0.012 to 0.06	$\tau_m = 37 \varepsilon_m^{-0.33} L^{-1} R^{1.66}$
Krishnamurthy <i>et al.</i> <sup>53)</sup>	Conductividad eléctrica	99.9%	$L=0.1$ to 0.45 m, $D=0.48$ m; 81 kg (max)	0.11 to 2.67	$\tau_m = C_1 Q_g^{-n}$ $C_1$ and $n$ are functions of flow regime and liquid depth

Tabla 3. Reportes de varios investigadores en las que miden la correlación del tiempo de mezclado<sup>3</sup>

Nakanishi<sup>3,4</sup> fue el primero en estudiar dicho fenómeno y encontró una correlación para determinar el tiempo de mezclado en función de la energía de agitación aplicada a la olla debido a la presencia de gas (Ecuación 2.)

$$\tau_m = 12.68 \times 10^3 \varepsilon_m^{-0.40} \quad (2)$$

Poco después se descubrió que el sistema no solamente dependía de la potencia de la agitación, sino también depende de la altura del baño, el diámetro del modelo, el flujo inyectado, la posición de los tapones y la relación L/D (Longitud/Diámetro) como se muestra en la Figura 16<sup>3,12, 13</sup>.



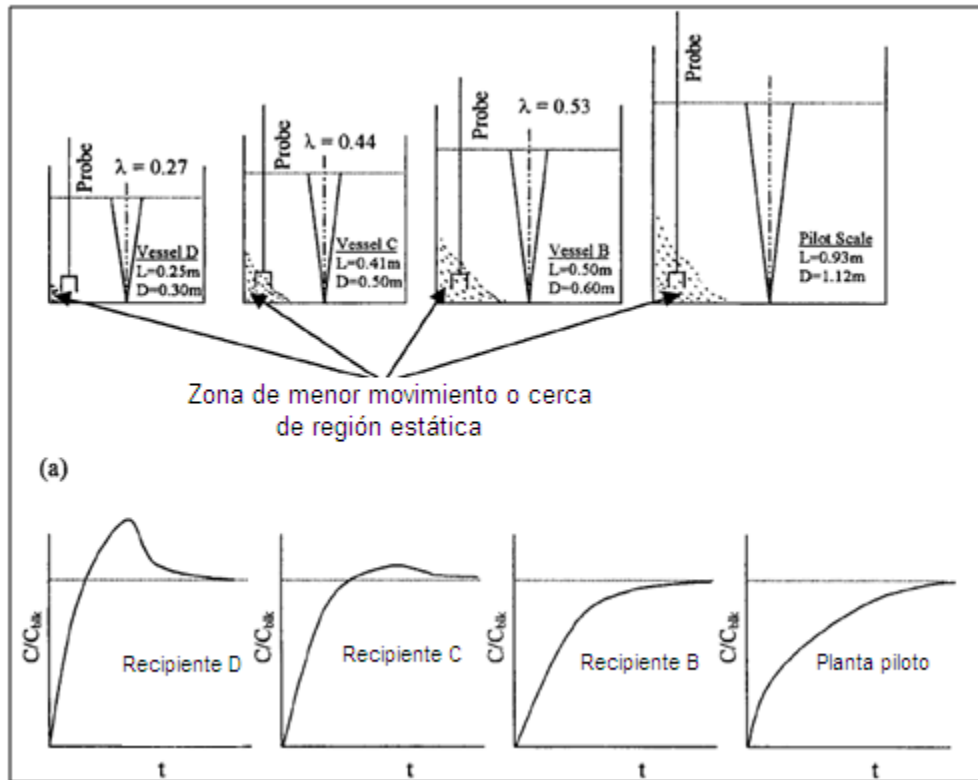


Figura 16. Influencia del tamaño del modelo en la medición del tiempo de mezclado<sup>3</sup>

También la posición del electrodo de medición de la concentración en el modelo físico se sabe que influye en la determinación del tiempo de mezclado, tal y como se muestra en la Figura 17<sup>3, 12, 13</sup>, debido a zonas muertas presentes en el modelo.

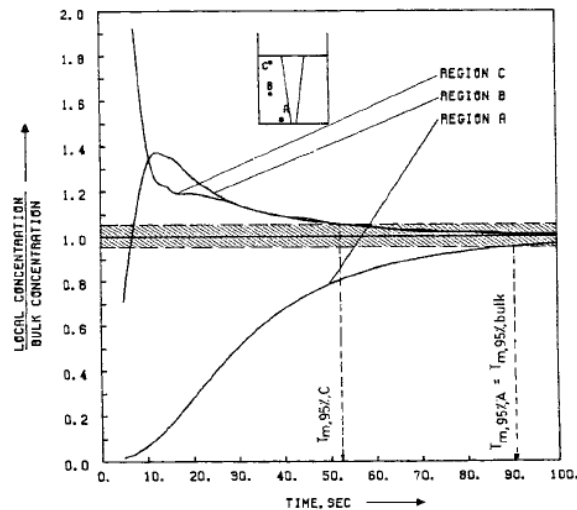


Figura 17 Efecto en los tiempos de mezclado en tres diferentes puntos de medición

Sano y Mori <sup>3,13</sup> fueron los primeros que incluyeron la altura y el diámetro del modelo y encontraron que el tiempo de mezclado además de la energía de agitación depende de estas variables geométricas a través de la siguiente correlación (Ecuación 3).

$$\tau_m = C_1 \varepsilon_m^{-0.33} R^{1.33} L^{-0.67} \quad (3)$$

Asai <sup>3,4</sup> propuso que el tiempo de mezclado se puede expresar a través de la siguiente correlación (Ecuación 4).

$$\tau_m = C_2 \varepsilon_m^{-0.33} R^{1.36} L^{-1} \quad (4)$$

Mazumdar y Guthrie <sup>3,4</sup> encontraron que el tiempo de mezclado obedece la siguiente ecuación (Ecuación 5).

$$\tau_m = C_3 \varepsilon_m^{-0.33} R^{1.66} L^{-1} \quad (5)$$

El sistema con dos fases líquidas, se estudió por Kim y Fruehan <sup>3, 4, 6</sup>, así como por Taniguchi <sup>3,12</sup>, quien observó que el agua absorbía el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, por lo que una fase de “escoria” ayudaba a reducir dicha absorción (como en el sistema real de acero-escoria). En estos experimentos también se encontró que la viscosidad de la fase superior define la interacción entre las dos fases líquidas, pues una viscosidad muy baja generaba una emulsificación alta y una viscosidad muy alta no generaba una capa uniforme encima del baño.

Ramírez Argáez<sup>16</sup> realizó un modelo matemático en el que determina los tiempos de mezclado y presenta los patrones de flujo presentes en el modelo usado para este trabajo variando la posición de inyección, el número de tapones y el flujo de gas (Figuras 18, 19 y 20)

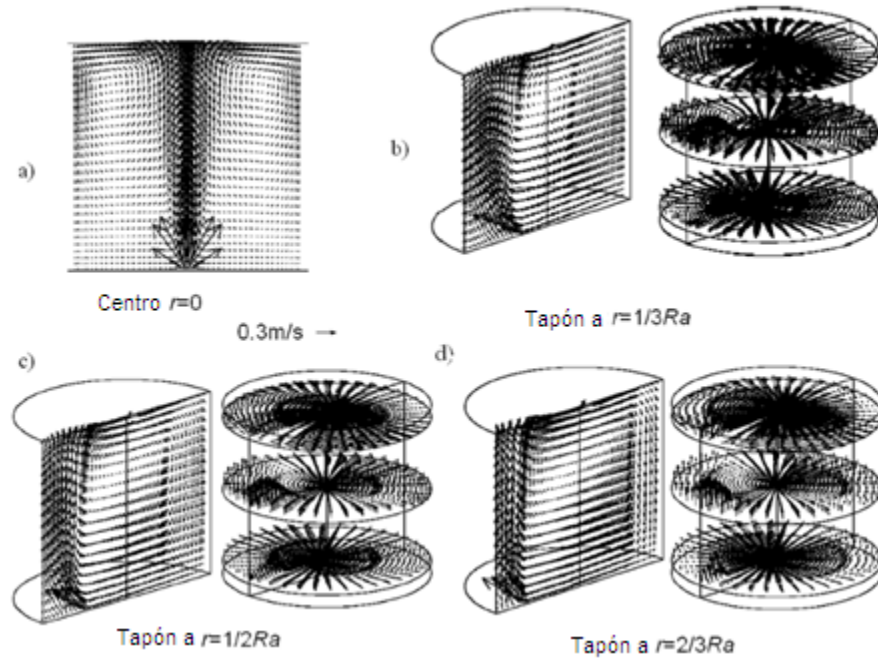


Figura 18. Perfiles de velocidad usando un solo tapón en diferentes posiciones radiales con un flujo de gas de 0.225 L/s<sup>16</sup>

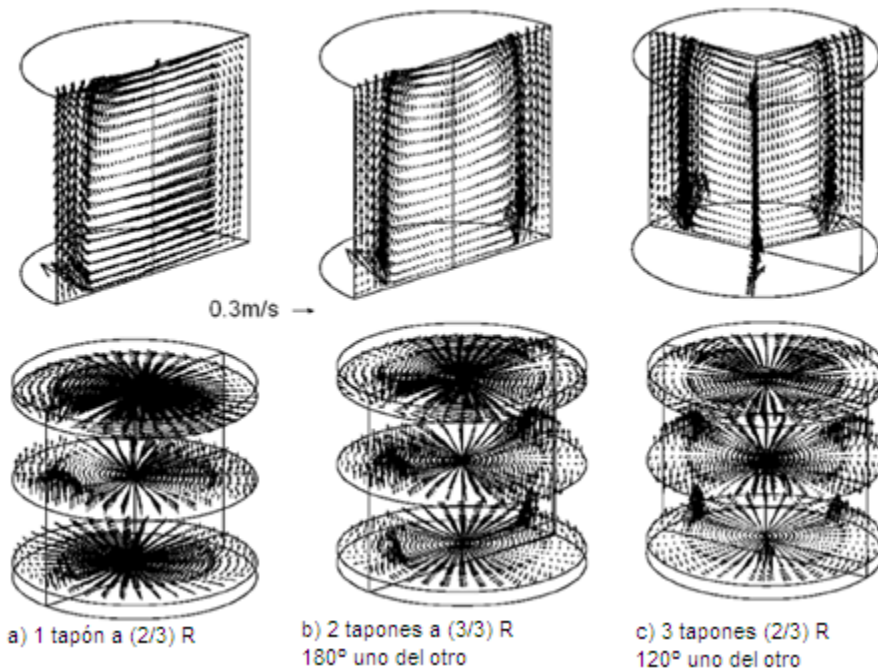


Figura 19. Perfiles de velocidad en el líquido con diferente número de tapones abiertos localizados en  $2/3R$  con un flujo de gas de 0.225 L/s<sup>16</sup>

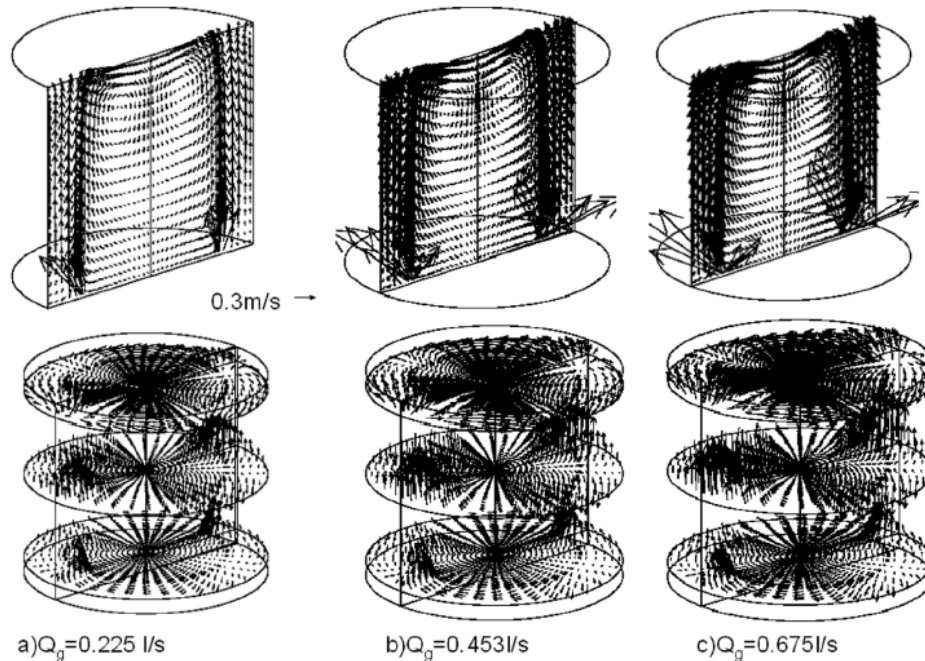


Figura 20. Perfiles de velocidad en el líquido inyectando diferentes flujos de gas con dos tapones abiertos localizados en  $2/3 R$  <sup>16</sup>

En este mismo artículo se encontró una ecuación para determinar los tiempos de mezclado del líquido que es válida para uno y dos tapones abiertos (Ecuación 6)

$$t_{mi} = 3.41m^{0.3}(NT)^{0.4}Q_g^{-0.25}(r/R)^{-0.12}(H/D)^{-0.44} \quad (6)$$

Donde  $m$  es la masa del líquido,  $Q$  es el flujo del gas,  $R$  es el radio del modelo,  $H$  es la altura del baño líquido y  $D$  es el diámetro del modelo

Hasta el momento, no se han reportado trabajos con modelos físicos que determine el efecto de la posición y número de tapones sobre el tiempo de mezclado con presencia de escoria. Este trabajo evaluó y reporta estos efectos.

## **Hipótesis**

El modelo físico del Horno Olla, ayudará a entender el proceso de mezclado en presencia de escoria con diferentes flujos y diferentes posiciones de los tapones, esto con el fin de optimizar el proceso y poder llevarlo a cabo en gran escala. Además la comparación de los resultados obtenidos previamente (sin escoria) con los resultados de este trabajo servirá para entender mejor como se ve afectado el mezclado en presencia de escoria.

## **Objetivos**

- Simular el mezclado de acero contenido en un Horno Olla en presencia de escoria mediante un trazador en un modelo físico de plexiglass. El modelo consta de un baño de agua con inyección de aire por el fondo y aceite de coche en la superficie, estos componentes representan al acero, argón y escoria respectivamente.
- Evaluar el efecto del flujo de gas, posición y número de tapones abiertos sobre los tiempos de mezclado en un baño en presencia de escoria.
- Medir la superficie expuesta por los ojos al insuflar diferentes flujos de gas.
- Comparar los resultados en presencia de escoria con los resultados obtenidos previamente sin escoria

## Capítulo 3. Metodología de Trabajo

La metodología que se siguió para realizar el trabajo experimental fue la siguiente:

- 1 Instalación del Modelo Físico.
- 2 Pruebas preliminares para determinar el tipo de aceite a usar y los flujos presentes en las pruebas, así como instalación y ajuste de accesorios para realizar los experimentos.
- 3 Comparación de propiedades físicas de diferentes opciones de sustancias orgánicas contra las propiedades de una escoria típica de horno olla.
- 4 Determinación de condiciones de operación.
- 5 Diseño experimental.
- 6 Protocolo de experimentación.

### 3.1 Instalación del Modelo Físico

La Figura 21 muestra la instalación del modelo físico usado para los experimentos desarrollados, dicha instalación consiste en:

- Embudo de adición de trazador.
- Electrodo medidor de pH.
- Flujómetro.
- Compresor.
- Distribuidor de flujo de gas.
- Llaves de gas.
- Conexiones rápidas de gas en el fondo de la olla.
- pH-metro.
- Cronómetro.
- Trazador en vaso de precipitados.
- Olla con una altura de 63.5 cm con altura del baño de 41 cm (90L de agua) y altura de aceite de 0.42 cm (955mL).

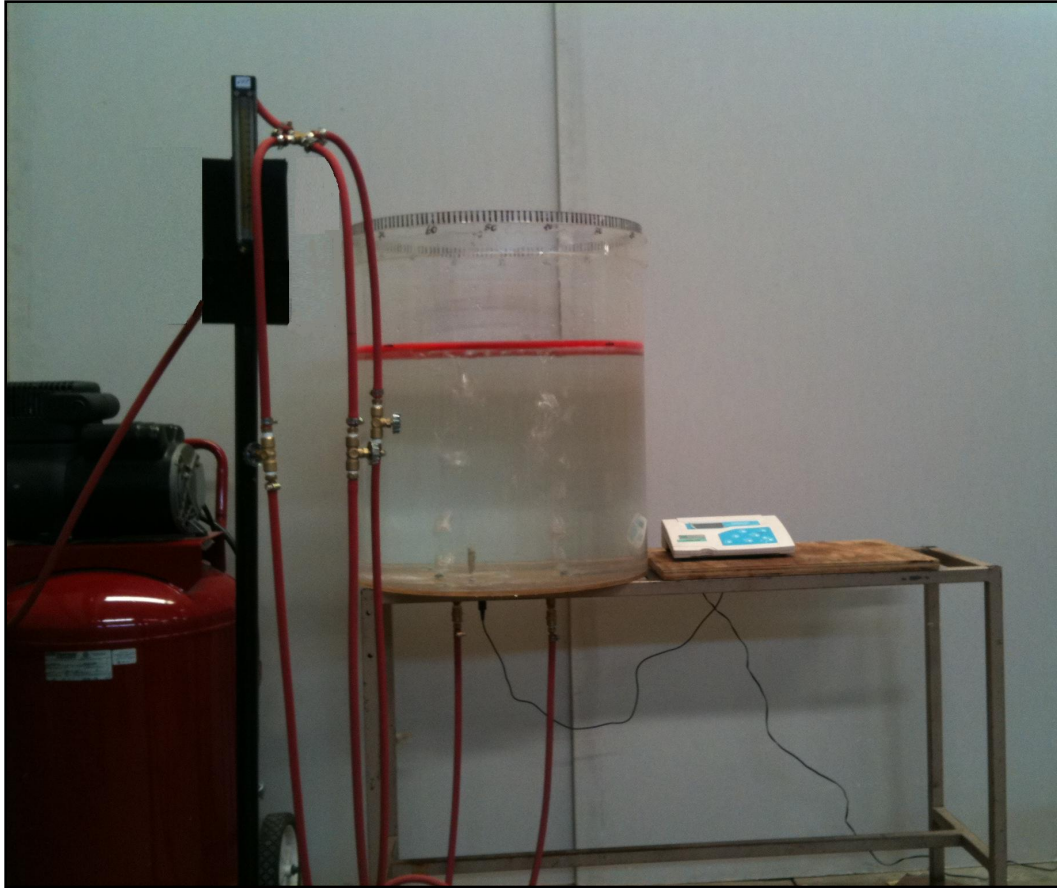


Figura 21. Instalación del modelo físico y accesorios usados

La Figura 22 muestra un ejemplo de la operación del modelo físico durante la experimentación, además, se muestra una fotografía del ojo presente en el modelo. En todos los experimentos se mantuvo el electrodo por debajo de la olla y en la posición de  $1/3 R$ . Las flechas de la figura muestran los patrones recirculatorios del fluido producidos por la inyección del gas. Se observa claramente la formación de la pluma de gas en el acercamiento y el ojo presente desde la vista superior.

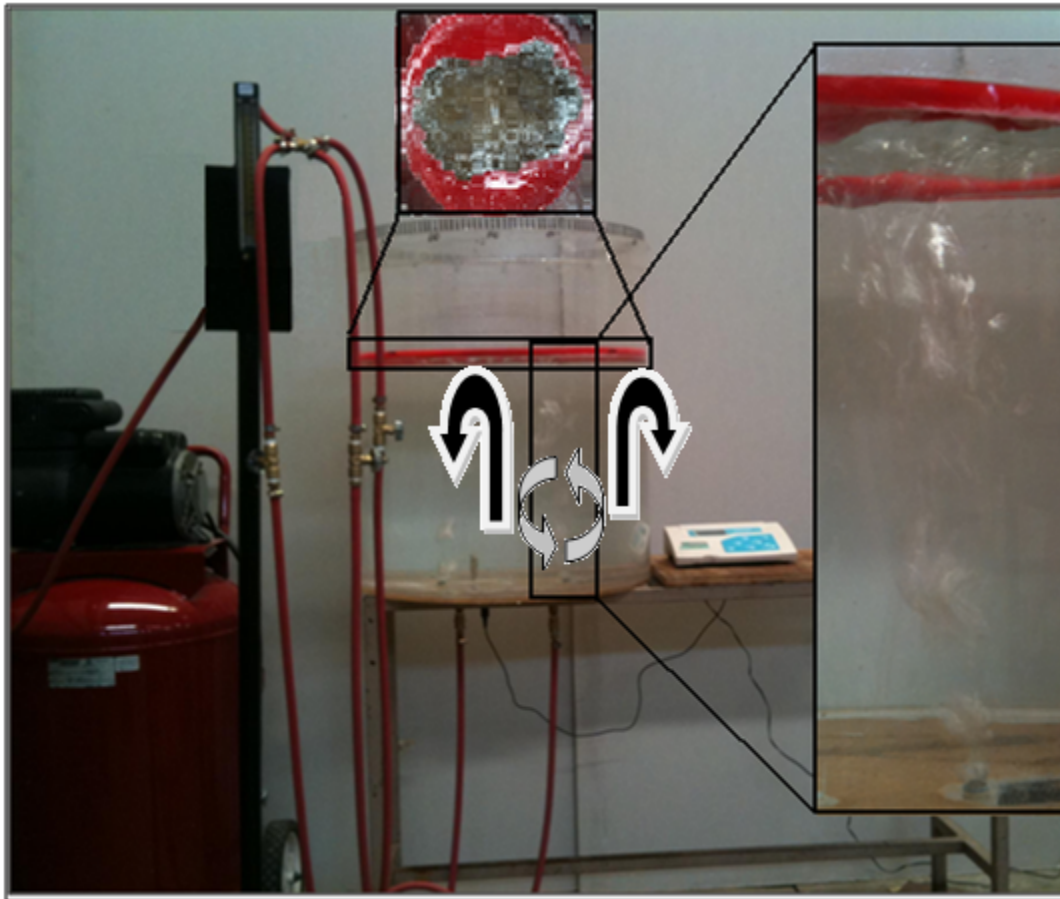


Figura 22. Funcionamiento de la instalación durante un experimento

La Figura 23 muestra un esquema detallado de la instalación usada y sus variantes para ajustar el experimento.

El mecanismo de inserción de trazador se conforma de un embudo donde se adiciona el trazador para permitir su entrada uniforme en todos los experimentos, además, cuenta con un soporte metálico con el cual se ajusta su longitud para adaptarse al sitio adecuado en el centro del ojo.

La distribución de flujo de gas se da a la salida del flujómetro en una cruceta, además se tienen 3 llaves conectadas a mangueras individuales para poder controlar 1, 2 ó 3 flujos en los experimentos. La inyección de gas depende de la(s) posición(es) necesaria(s) para el experimento, y el sistema de inyección se compone de conexión a manguera, conexión rápida macho y conexión rápida hembra. Todas las conexiones son para gas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de apertura.



El electrodo para medición de pH se sitúa en la base de la olla para evitar su contacto con el aceite y siempre se encuentra situado en 1/3 del radio en diferentes posiciones dependiendo de la cantidad de tapones abiertos.

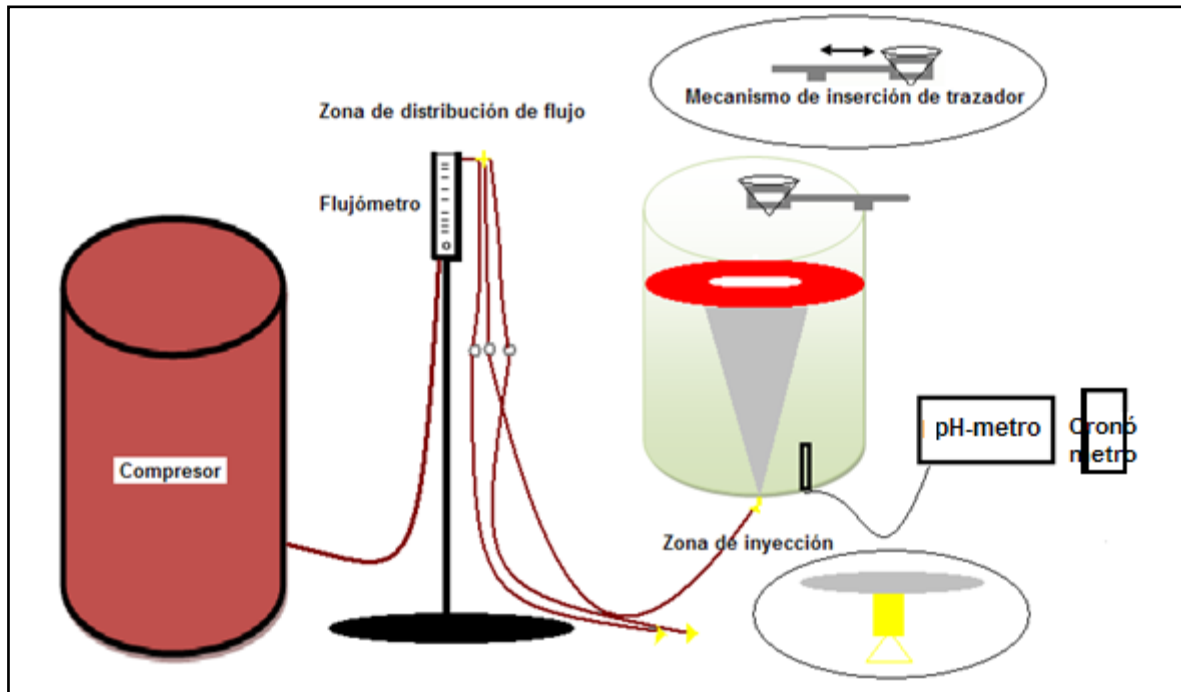


Figura 23. Esquema detallado de la instalación del modelo físico

### 3.2 Pruebas preliminares

Anteriormente se habían hecho pruebas para determinar si se usaba agua corriente o agua destilada. Se determinó que el agua corriente no es adecuada para su uso por su concentración de sales. Además se determinó que el trazador indicado era NaOH pues se disocia inmediatamente en el agua.

También se había determinado que el pH inicial ideal es de alrededor de 6, pues contiene una baja cantidad de iones  $H^+$  y casi nula cantidad de iones  $OH^-$ . El pH final se calculó para que fuera mayor a 9. La calibración y la limpieza durante la experimentación son muy importantes para disminución del error experimental. Al final de cada prueba se restablece el pH original neutralizando al agua con soluciones de HCl y NaOH 1M.

Se buscó exhaustivamente en la literatura un fluido adecuado para simular la escoria. La propiedad más importante de una escoria típica de horno olla es la viscosidad, cuyo valor típico está de alrededor de 270 cP. Se hicieron pruebas preliminares con aceite de silicón de 100 cP de viscosidad, pues es comúnmente usado en estudios reportados en la literatura pero fue descartado debido a una alta emulsión de este aceite en agua durante el proceso de mezclado. Además se seleccionaron aditivos para su posible uso, pero también se descartaron, debido a su alta viscosidad (mayor a 1000 cP) y porque se formaba un toroide durante la inyección de gas.

Se hizo una selección de diferentes aceites de coche de diferentes marcas que cumplieran con la viscosidad buscada y se llegó a la conclusión de que el mejor aceite a usar para simular la escoria es el de la marca Quaker State Alto Kilometraje SAE 25 W 50. Este aceite según la hoja de seguridad no presenta interacción alguna con el agua, además es de densidad menor a la del agua y reporta una viscosidad cinemática similar a la de escorias de horno olla. Además, el aceite marca Quaker State es rojo, lo que permite la distinción inmediata de las dos fases y una adecuada medición de la superficie del ojo expuesto a través de un software para analizar imágenes.

### 3.3 Condiciones de operación

El recipiente fue escalado en un trabajo previo, a una escala de 1/6 de un Horno Olla industrial de la empresa TAMSA (ver Tabla 4)<sup>8</sup>.

	Altura del Horno (m)	Altura del Baño (m)	Diámetro del horno (m)
Olla industrial (140 Ton)	3.736	2.460	3.226
Modelo físico	0.622	0.410	0.537

Tabla 4. Datos de escalamiento dimensional del modelo físico<sup>8</sup>

El escalamiento dinámico se realiza a través de la similitud de fuerzas que actúan en el reactor con las que actúan en el modelo y promueven la agitación. En este sentido, los números adimensionales de Froude modificado deben ser iguales en el modelo y en el reactor para asegurar la similitud dinámica. Este número adimensional representa un cociente de fuerzas inerciales y fuerzas boyantes, que son las que dominan el ascenso de las burbujas que a su vez promueven la agitación del baño. La igualdad de estos números en el modelo y en la olla industrial permite escalar los flujos de gas a inyectar en el modelo ( $Q_{fs}$ ) respecto al flujo inyectado en la olla ( $Q_{mod}$ ) y los resultados de este escalamiento se ven en la Tabla 5. La ecuación que define este escalamiento es la siguiente.

$$Q_{mod} = \lambda^{2.5} Q_{fs} \quad (7)$$

	Flujos de gas (m <sup>3</sup> /min)			Flujos de gas (L/min)		
	Olla industrial	0.61748	1.499288	3.262568	617.48	1499.288
Modelo físico	0.007	0.017	0.037	7	17	37

Tabla 5. Escalamiento dinámico usado<sup>8</sup>

Estos datos de flujo de gas se encuentran en el rango operativo de la planta de TAMSA (13.605 a 40.8 L/min). Se determinó usar un flujo bajo de 7 L/min hasta 37 L/min para observar los efectos del flujo de gas y para comparar con resultados previamente obtenidos. Estos flujos son usados para lograr una uniformidad química y térmica del acero.

Los tapones también tienen tamaño fijo de ¼ de pulgada, las posiciones donde se encuentran son centro, 1/3, 1/2 y 2/3 del radio de la olla, y el espesor de la capa de escoria es constante (0.42 cm).

### 3.4 Diseño experimental

En la Tabla 6 se muestra la matriz de experimentos realizada, en donde además se señalan las posiciones usadas para el trazador, las posiciones usadas para el electrodo, los flujos y unas imágenes para futuras referencias.

Cada experimento se llevó a cabo por triplicado para obtener una estimación del error experimental y hacerlo representativo.

En la Figura 24 y en la Tabla 6 se muestran con símbolos las posiciones de inyección de aire. La zona donde se encuentra el electrodo para medición de pH (recuadro rosa), debe estar lo más alejado de los ojos de la pluma formada durante la inyección de gas pero lejos de las zonas muertas presentes en el modelo. Además, el trazador (marcado con líneas rojas) se debe agregar sobre la superficie libre en la posición de una de las boquillas para que éste entre en contacto con el agua y se pueda distribuir homogéneamente.












	Experimento	Flujo (L/min)	Posición (r/R)	Número de Tapones	Representativo	Posición de trazador	Posición del electrodo
Efecto Posición	1	7	0	1		1	1
	2	17					
	3	37					
	4	7	1/3	1		2	
	5	17					
	6	37					
	7	7	1/2	1		3	
	8	17					
	9	37					
	10	7	2/3	1		4	
	11	17					
	12	37					
	13	7	4/5	1		5	
	14	17					
	15	37					
Efecto dos tapones	16	7	1/3, 1/3	2		6	2
	17	17					
	18	37	1/2, 1/2	2			
	19	7					
	20	17	2/3, 2/3	2			
	21	37					
	22	7	4/5, 4/5	2			
	23	17					
	24	37					
	25	7					
26	17	1/3, 1/3, 1/3	3		6	1	
27	37						
28	7						
29	17	2/2, 2/3, 2/3	3				
30	37						
31	7						
32	17						
33	37						

Tabla 6. Matriz de experimentos usada para este trabajo

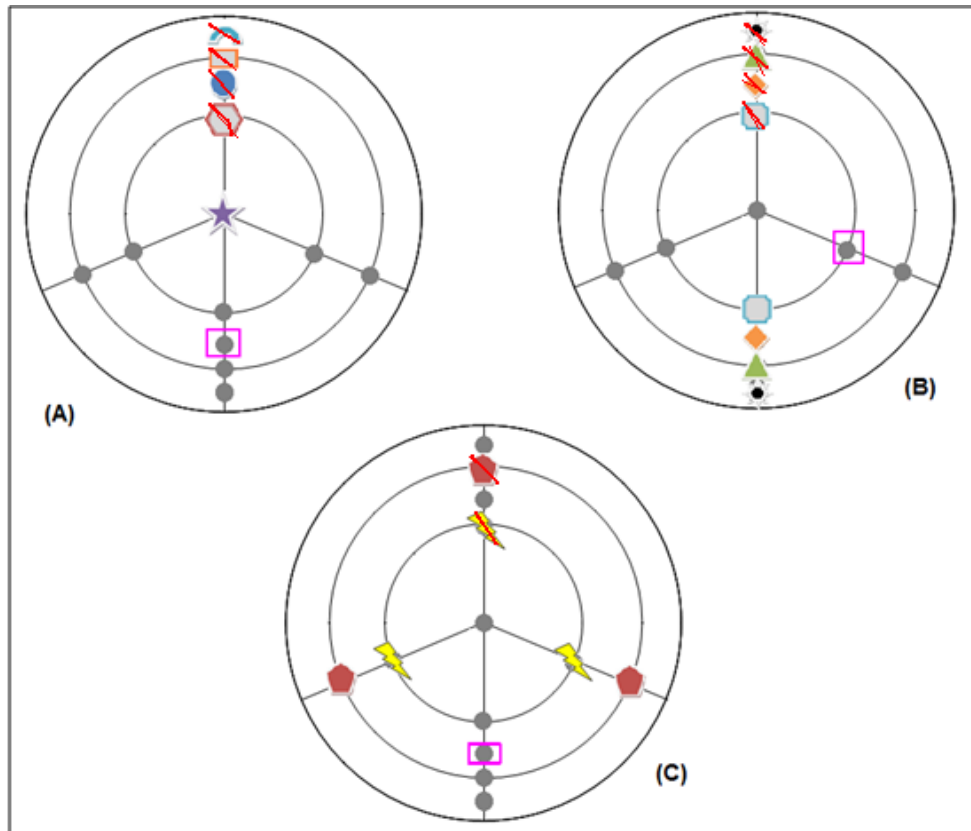


Figura 24. Esquema de posición con un tapón abierto (A), dos tapones abiertos (B) y tres tapones abiertos (C)

### 3.5 Protocolo de experimentación

Para la realización de los experimentos se siguió un protocolo para disminuir el error experimental y minimizar las variables externas (como la temperatura del agua); dicho protocolo consiste en:

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

### 3.5.1 Montaje y desmontaje

El material usado para los experimentos consisten en:

- Termómetro de mercurio
- Compresor
- Cámara de video
- Cronómetro
- Extensiones eléctricas
- Flujómetro (L/min)
- Cinta teflón
- Nivel
- Garrafones de agua destilada
- Aceite Quaker State
- Piseta
- vasos de precipitados de 50mL, 250mL y 500mL respectivamente
- frascos de 500mL de PVC
- 10 tornillos de acero de 1/4"
- Soluciones amortiguadoras (4.01, 7.00 y 10.01)
- Solución electrolítica
- Soluciones de NaOH 1M
- Soluciones de HCl 1M
- Embudo
- Pipeta de 10mL
- Propipeta
- Mangueras para gas de 1/4"
- Conexión en cruz de bronce de rosca fina
- Seis espigas (conexión manguera) de 1/4" de bronce
- Tres espigas (conexión manguera) de 1/4" rosca fina de bronce
- Tres conexiones rápidas macho de 1/4"

Todo el equipo de vidrio es limpiado cuidadosamente antes de la experimentación y el equipo que va a ser usado en el modelo se cubre con cinta teflón y es enjuagado al terminar de usarse. En caso de presentar oxidación se lavan con agua y jabón, y se lijan un poco (en caso de los tapones de acero se pintaron previamente para evitar corrosión).

El agua usada se cambia cuando se tienen partículas suspendidas o depositadas y/o después de realizar 15 experimentos. Si el agua aún se ve cristalina únicamente se refresca con un garrafón de agua destilada. Esta metodología puede ocasionar variaciones de densidad en el agua debido a la acumulación de salmuera, sin embargo se realizó de esta manera pues funcionó correctamente en el mezclado sin presencia de aceite y además se optimizó al máximo el uso de agua gastando el mínimo. Evidentemente las condiciones variaron por el uso del aceite y puede modificarse la tendencia.

Si el modelo permanece lleno después de la experimentación, éste se cubre con una bolsa negra para evitar el paso de polvo o partículas que puedan interferir con el estudio.

Para realizar la calibración del equipo de medición, primero se insufla un flujo bajo de aire al modelo para abrir el ojo y enseguida se mide la temperatura con el termómetro. Posteriormente se conecta el electrodo previamente enjuagado con agua destilada al pHmetro el cual se calibra a la temperatura indicada, primero se sumerge el electrodo a la solución amortiguadora de pH 7.00, posteriormente a la de pH 10.01 y finalmente a la de 4.01 realizando su respectivo enjuague al cambiar la solución.

Finalmente, el electrodo se instala por debajo de la olla en la posición deseada de acuerdo al número de tapones abiertos (previamente instalados junto con los tapones de acero) y como se ilustra en la Figura 21. Inmediatamente después se ajusta el flujo de gas y se procede a realizar la prueba de mezclado.

### **3.5.2 Proceso Experimental**

Se inyecta gas a un flujo de 17 L/min para no emulsificar el aceite y se procede a realizar la medición de pH hasta que no presente variación, en cuanto sucede esto se ajusta el mismo a un valor de alrededor de 6 con soluciones de NaOH y HCl.

Se ajusta el flujo de gas al nivel deseado y se vuelve a ajustar el pH en caso de presentar variación. Se procede a la experimentación registrando en video el pHmetro y el cronómetro. El video se guarda digitalmente en una computadora por lo que previamente se nombra con las características del experimento como flujo, posición del mismo y número de prueba. El cronómetro se acciona en cuanto se termina de adicionar el trazador en la posición requerida y se registra el video durante 5 minutos.

Al finalizar la prueba se detiene la grabación y se reajusta nuevamente el pH a 6 con las soluciones de HCl para iniciar otro experimento.

### 3.5.3 Tratamiento de datos

Con ayuda del video, se pasan los datos a hojas de Excel y/o de SigmaPlot, registrando el pH de inicio y el tiempo. Se obtiene un valor de pH cada segundo desde el inicio de la prueba hasta los 120 segundos o hasta que se alcance el criterio de mezclado.

El pH final se transforma a concentración adimensional y se calculan los valores de pH que definen el criterio de mezclado (en nuestro caso se uso el +/- 5% de la composición de equilibrio), es decir los pH's entre 95 y 105% del valor de equilibrio. Se grafica la evolución con el tiempo del pH y se proceden a analizar las gráficas para determinar el tiempo de mezclado de cada experimento.

## Capítulo 4. Resultados y Análisis

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

En la Figura 25 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 37 L/min y un tapón colocado a  $\frac{1}{2}$  del radio de la olla. Las tres líneas de la figura corresponden a las 3 réplicas realizadas en este experimento, mientras que las líneas horizontales representan el  $\pm 5\%$  de la concentración de equilibrio, es decir nuestro criterio de mezclado. La figura muestra la gráfica de la evolución de la composición con el tiempo, mientras que la imagen inferior es una fotografía del ojo que se forma en dicho experimento. Básicamente, las evoluciones de las concentraciones en cada réplica siguen la misma tendencia, es decir, crecen desde la concentración de inicio (descrita previamente) hasta la concentración de equilibrio que es alcanzada en un cierto tiempo. El comportamiento que muestra la evolución de soluto con el tiempo indica que el medidor de pH está localizado en una zona de poco movimiento convectivo por lo que el tiempo de mezclado depende en gran medida de la dispersión de soluto por turbulencia y por difusión



molecular y es por eso que la concentración va creciendo gradualmente hasta alcanzar el equilibrio.

Para este ejemplo, los tiempos de mezclado de las tres réplicas son 28 segundos (línea azul), 26 segundos (línea roja) y 29 segundos (línea verde). El mezclado está asociado con los mecanismos de transferencia de masa tanto por difusión turbulenta como por convección, siendo la convección del líquido la que arrastra al soluto y lo transporta siguiendo el patrón de flujo del agua, mientras que la turbulencia ayuda a dispersar al soluto lateralmente al circuito convectivo. En todos los casos el electrodo para medir pH se encuentra en la parte inferior de la olla, pero en este ejemplo se sitúa a  $1/3$  del radio de la olla a  $180^\circ$  de la pluma y la membrana del electrodo se encuentra a 6 cm de altura partiendo de la base de la olla.

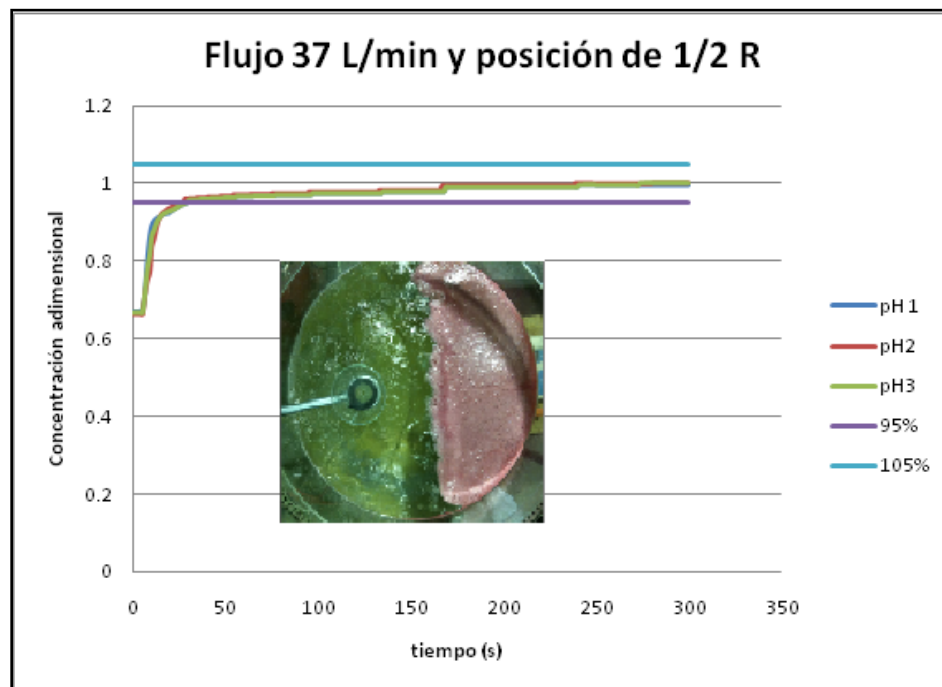


Figura 25. Ejemplo de gráfico de concentración vs tiempo usado para determinar el tiempo de mezclado y el ojo presente en el experimento

## 4.2 Influencia del flujo de gas y la posición de inyección

### 4.2.1 Un tapón abierto

La Figura 26 corresponde al tiempo de mezclado en función del flujo de gas que se inyecta por un solo tapón en la posición central de la olla ( $R=0$ ). Se pueden observar tres curvas que corresponden a las tres réplicas realizadas y también se observan otros resultados que corresponden a los experimentos realizados previamente sin escoria<sup>9</sup>. Se determinaron los valores promedio del tiempo de mezclado y la desviación estándar representada con líneas de error. Como es esperado, la gráfica muestra que el tiempo de mezclado es inversamente proporcional al flujo de gas. Sin embargo los resultados obtenidos experimentales presentan una tendencia mucho menor a los obtenidos sin aceite lo cual no puede ser cierto pues el aceite genera una pérdida sustancial de momentum y el tiempo de mezclado debería haber sido mayor. Es evidente que el tiempo de mezclado disminuye cuando se aumenta el flujo pues hay más burbujas que arrastran más líquido y que también generan más turbulencia en el líquido, la cual propicia una mayor rapidez de mezclado. Analizando las imágenes del ojo, se puede observar que el tamaño de éste es directamente proporcional al flujo de gas, lo que indica que habrá una mayor superficie expuesta y en el caso del acero, la oxidación será mayor. El mayor tiempo de mezclado en promedio fue de  $74.33 \pm 0.55$  segundos con un flujo de 7 L/min, contra  $93.05 \pm 5$  segundos obtenidos sin escoria y el menor tiempo de mezclado resultó ser de  $10.66 \pm 1.52$  segundos con un flujo de 37 L/min contra  $38.81 \pm 2.88$  segundos obtenidos sin escoria, por otro lado, la mayor superficie expuesta fue registrada en el flujo de 37 L/min y la menor superficie expuesta se presenta durante el flujo de 7 L/min. Los ojos muestran que en flujo de 37 L/min la superficie expuesta es de casi la mitad (48.93%) mientras que a 7 L/min es solamente de 30.31% (ver Tabla 7)

## Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas R=0

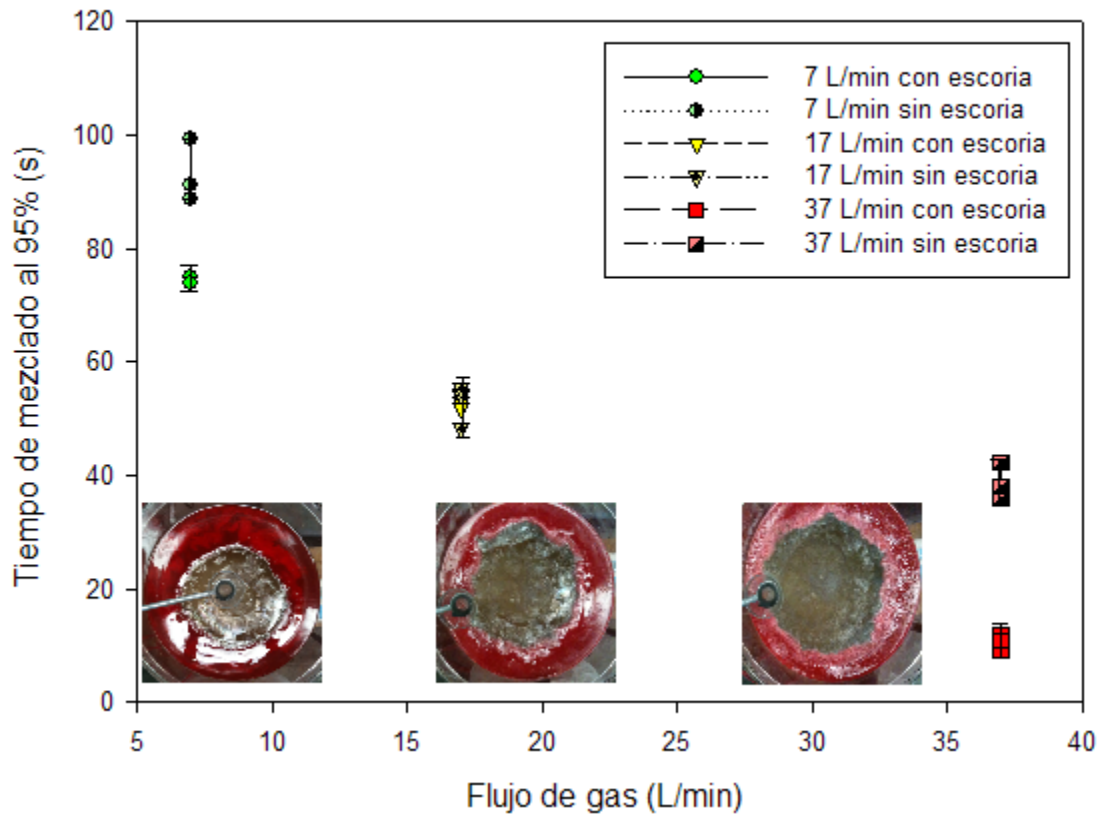


Figura 26. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en la posición central

La Figura 27 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas utilizado por un solo tapón localizado en 1/3 del radio. En este caso el tiempo de mezclado no presenta una tendencia clara, es decir, no es inversamente proporcional al flujo de gas, sino que aumenta de 7 L/min a 17 L/min y disminuye con 37 L/min. Una explicación es que al inyectar 17 L/min, la capa de aceite sufre una abertura y es desplazada a las orillas del cilindro aumentando el grosor de la escoria en esas zonas. Esta capa más gruesa de escoria que la original, frena la agitación promoviendo una pérdida de momentum por fricción entre el agua y el aceite. Además, se observa que el ojo no es completamente circular sino que se distorsiona y forma un aro delgado cerca de la pared del reactor, el cual desaparece completamente al inyectar el flujo de 37 L/min. Se alcanza a observar cómo la zona expuesta es bastante amplia. El mayor tiempo registrado es de  $42.33 \pm 2.08$  segundos en promedio y corresponde al flujo de 17 L/min, en cambio

el menor tiempo de mezclado es de  $9.66 \pm 0.57$  segundos en promedio correspondiente al flujo de 37 L/min; estos resultados difieren en gran medida de los resultados obtenidos sin escoria<sup>9</sup> donde el mayor tiempo de mezclado es de  $57.62 \pm 4.81$  segundos para el flujo de 7 L/min y el menor tiempo lo reporta el flujo de 37 L/min con  $32.66 \pm 2.32$  segundos. Los ojos exponen un área promedio de 25.22, 35.32 y 55.14% respectivamente (ver Tabla 7), por lo que el flujo de 37 L/min deja descubierta un poco más de la mitad de la superficie, lo que significaría una probable sobreexposición del acero al ambiente, cosa que es indeseable en un Horno Olla real.

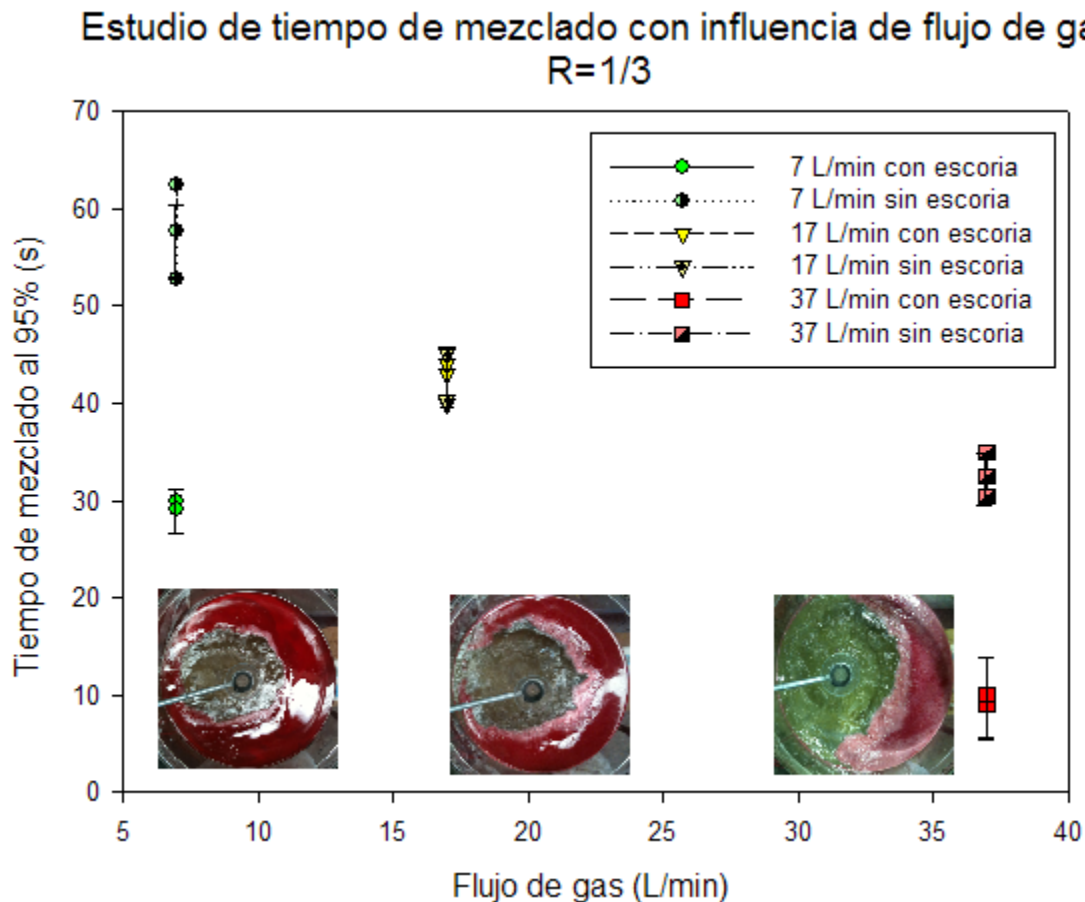


Figura 27. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/3 R

En la Figura 28 se muestra el tiempo de mezclado obtenido en función del flujo de gas inyectado a través de un solo tapón colocado en la posición de  $\frac{1}{2}$  del radio. Se puede observar que se retoma la tendencia en donde el tiempo de mezclado

disminuye nuevamente con respecto al flujo de gas inyectado, aunque la desviación estándar de la determinación de los tiempos de mezclado es alta, lo que indica variaciones experimentales con esta posición de inyección. Además, analizando los ojos se muestra una clara tendencia de aumentar su tamaño conforme el flujo de gas aumenta. En este caso se puede observar que el ojo se abre completamente en cuanto el flujo se incrementa. La inyección de gas propicia que se forme una zona muerta mucho mayor, la cual retrasa de manera significativa la agitación en el baño. El mayor tiempo registrado en esta posición se presenta en el flujo de 7 L/min el cual es de  $49.33 \pm 1.15$  segundos en promedio contra  $67.26 + 5.48$  segundos obtenidos sin presencia de escoria<sup>9</sup>, este valor de tiempo es únicamente 3 segundos superior al flujo de 17 L/min, lo que indica que nuevamente dicho flujo no presenta la suficiente fuerza como para vencer el freno impuesto por la capa de aceite. El menor tiempo de mezclado lo registra el flujo de 37 L/min y es de  $27.66 \pm 1.52$  segundos en promedio contra  $32.25 \pm 4.98$  segundos que se obtuvieron anteriormente<sup>16</sup>. El flujo de 7 L/min expone una superficie de 20.62%, el flujo de 17 L/min una superficie de 45.75% lo que es un poco menos de la mitad, pero el flujo de 37 L/min expone una superficie de 57.53% lo que es 7% mas de la mitad (ver Tabla 7).

## Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas R=1/2

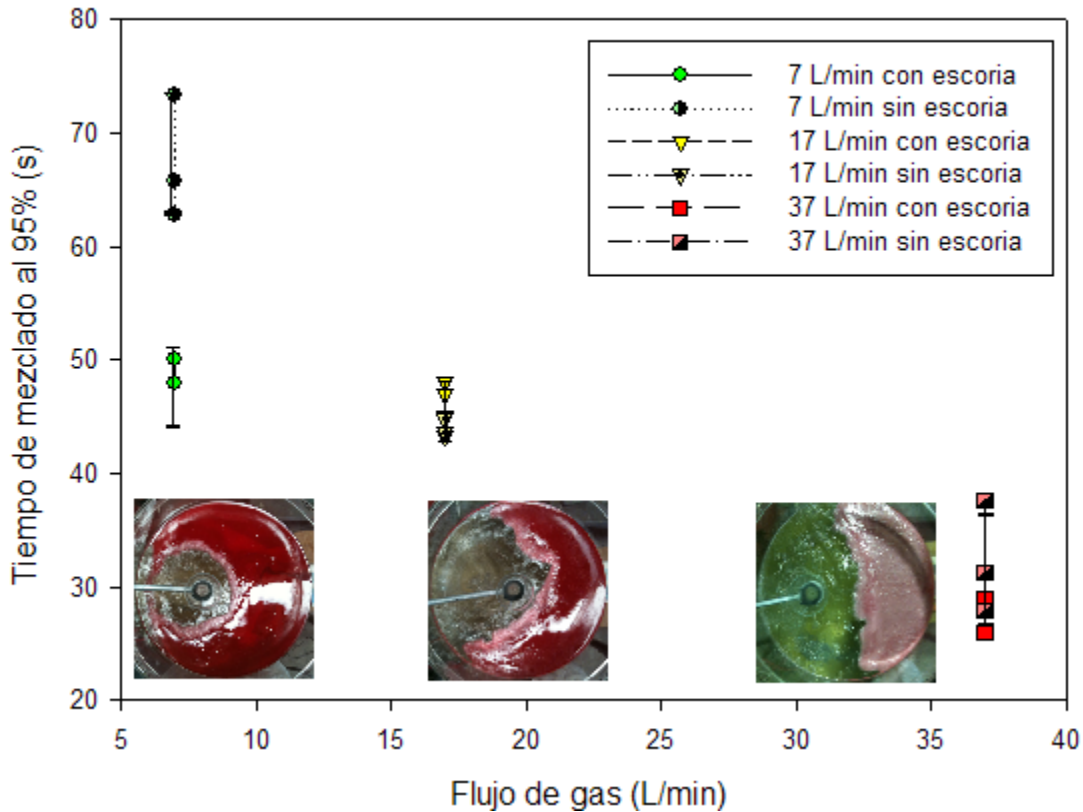


Figura 28. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/2 R

La Figura 29 muestra el tiempo de mezclado obtenido en función del flujo de gas inyectado a través de un solo tapón colocado en 2/3 del radio. Nuevamente se puede observar de manera dramática cómo se incrementa el tiempo de mezclado al incrementar el flujo de gas de 5L/min a 17L/min y luego vuelve a disminuir cuando se inyecta 37L/min. Esto se explica porque se suma otro fenómeno al freno de la agitación, es decir, la capa de aceite incrementa su grosor y frena al líquido, lo que se suma a que la pluma inyectada en 2/3 de R está cerca de la pared del reactor por lo que existe una condición de fricción con la pared del recipiente que frena aún más la circulación del agua. También se observa que el ojo expuesto con flujo de 17 L/min es muy similar al presentado con 7 L/min pero es mucho más grande con un flujo de 37 L/min. Nuevamente el mayor flujo genera la suficiente turbulencia, de tal modo que los frenos impuestos tanto por la capa de aceite como por la pared del reactor son superados y entonces el tiempo de

mezclado disminuye. Este alto flujo también puede presentar una complicación y es que en este caso la agitación es tan violenta que el aceite comienza a emulsificarse con el agua, además de que se expone una gran superficie de baño al ambiente. El mayor tiempo de mezclado es de  $34.66 \pm 1.52$  segundos en promedio y lo presenta el flujo de 17 L/min a diferencia de  $83.25 \pm 4.55$  segundos obtenidos experimentalmente sin la presencia del aceite<sup>9</sup>, en cambio el menor tiempo de mezclado fue de  $14.66 \pm 0.57$  segundos en promedio y fue registrado con un flujo de 37 L/min contra  $28.68 \pm 2.79$  segundos obtenidos anteriormente. Esta posición presenta un comportamiento similar a la registrada en la posición de 1/3 del radio, únicamente con un descenso en el tiempo de mezclado de alrededor de 10 segundos. También cabe mencionar que esta posición resultó ser una de las mejores en el experimento de 1 tapón abierto, pues el tiempo es el menor en caso de flujos bajos aunque aumentó un poco en flujo alto. Para este caso se observa una cantidad de superficie expuesta muy grande para el flujo de 37 L/min, con una cantidad del 61.33% contra una superficie de únicamente 19.46% para el flujo de 7 L/min (ver Tabla 7). Además de usar un flujo demasiado alto y emulsificar al aceite, la superficie expuesta es demasiada aunque el tiempo de mezclado es bajo.

## Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas R=2/3

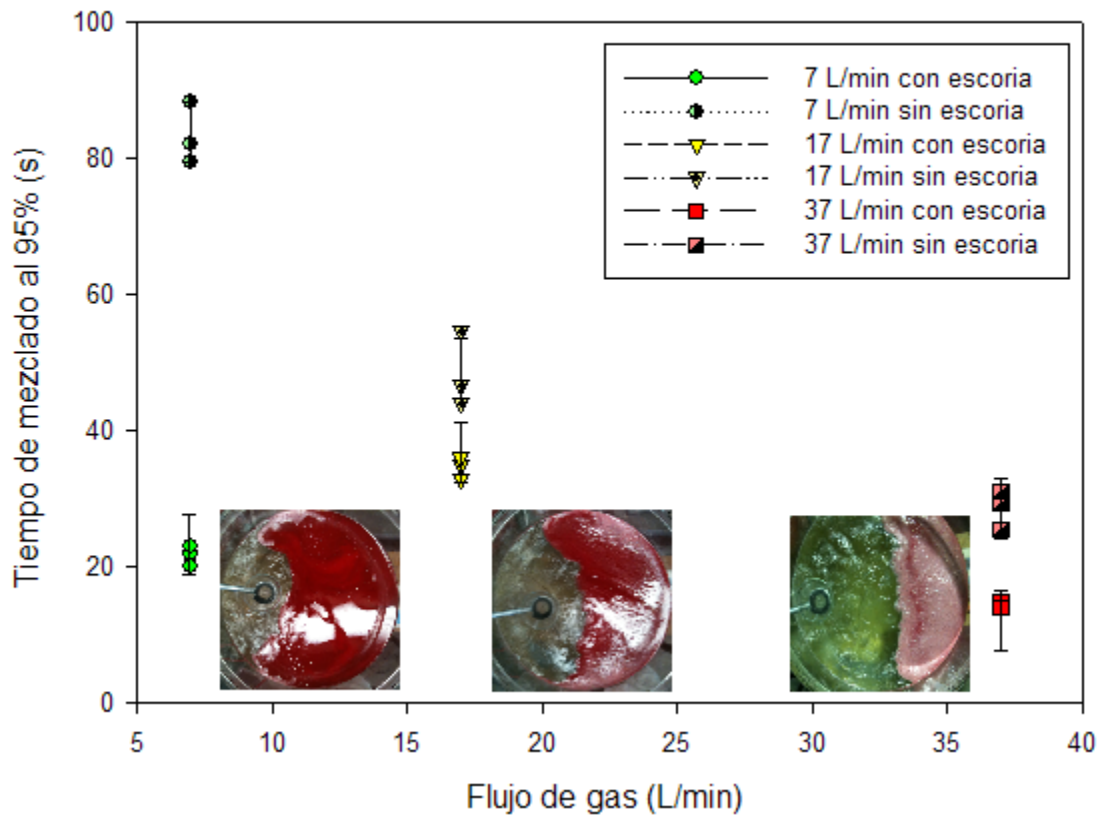


Figura 29. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 2/3 R

En la Figura 30 se muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas con un solo tapón en la posición de 4/5 del radio. Lamentablemente no se tienen resultados para realizar una comparación pero en este trabajo se realizaron únicamente para determinar la superficie expuesta por los ojos al realizar la inyección de gas. El análisis de esta posición tiene poco impacto industrial, ya que en un horno real esta posición presenta muchas complicaciones pues el flujo ascendente de gas podría desgastar el refractario del horno. Además el chorro puede desgastar aún más el refractario y finalmente se tiene el fenómeno de salpicaduras o “splashing”, el cual además de generar oxidación del material desgastaría de manera significativa e irregular el refractario.

Nuevamente se puede apreciar que el tamaño del ojo va aumentando conforme se incrementa el flujo de manera significativa, como también se muestra en la



posición central y  $\frac{1}{2}$  del radio a diferencia de la posición de  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{2}{3}$  del radio. La superficie expuesta, de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 7, es de 28.52% para el flujo de 7 L/min, de 54.42% para el flujo de 17 L/min y de 52.41% para el flujo de 37 L/min, como se puede observar la superficie expuesta disminuye y es por la pérdida de momentum provocada por la pared.

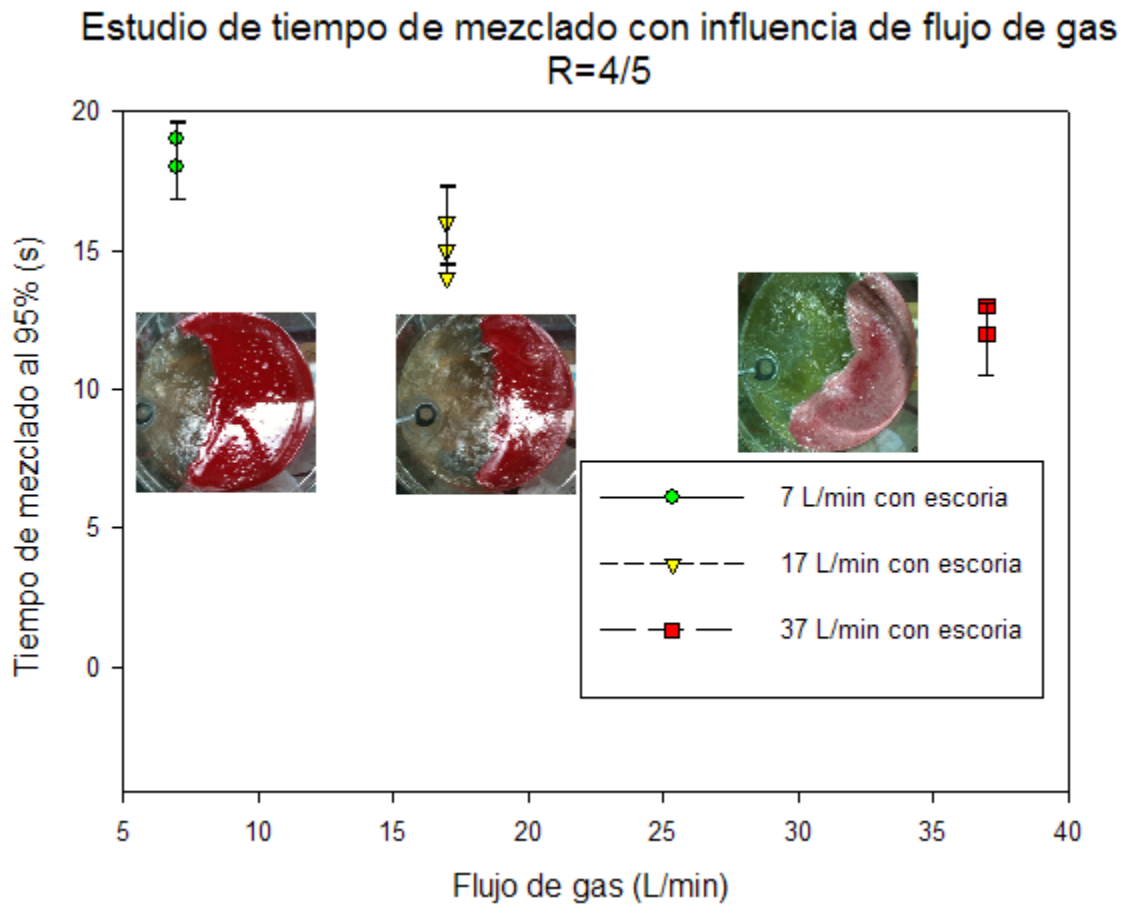


Figura 30. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 4/5 R

En la Figura 31 se observa de manera condensada el efecto de la posición del tapón abierto y del flujo de gas inyectado sobre el tiempo de mezclado. Las líneas están a un flujo de gas constante (verde a 7 L/min, amarillo a 17 L/min y rojo a 37 L/min), también se muestran las líneas que se obtuvieron al analizar el mezclado sin la presencia del aceite que simule la escoria (verde pálido a 7 L/min, amarillo pálido a 17 L/min y rojo pálido a 37 L/min). En general se observa una tendencia en la que el tiempo de mezclado disminuye al colocar el tapón más alejado del

centro, aunque en la posición de  $1/2$  del radio existe un incremento en el tiempo de mezclado. También se observa que los resultados difieren significativamente con los resultados obtenidos sin aceite que simule la escoria, sorprendentemente los tiempos de mezclado disminuyeron en lugar de aumentar como era esperado para los flujos de 7 L/min y 37 L/min. Curiosamente se obtuvieron tiempos muy similares para el flujo de 17 L/min con respecto a los obtenidos en el trabajo previo<sup>9</sup>, aunque de igual manera los tiempos son menores en lugar de ser mayores.

Desde otra perspectiva, en la Figura 32 se muestra el tiempo de mezclado al 95% vs el flujo de gas a posición constante (centro,  $1/3$ ,  $1/2$ ,  $2/3$  y  $4/5$ ) y de igual manera se observa que las curvas son sumamente diferentes cuando se comparan con los resultados obtenidos previamente. Esto habla que la experimentación para estos experimentos en particular puede estar equivocada, debido al error experimental o las condiciones de trabajo cuando se realizaron los experimentos

El mejor tiempo de mezclado se presenta en la posición de  $2/3$  R y con un flujo de 7 L/min. En esta posición se obtuvo el menor tiempo de mezclado y un ojo expuesto muy pequeño únicamente de 19.46% por lo que representaría una posición óptima para la inyección de gas. En la Tabla 7 se muestra de manera condensada la cantidad de superficie expuesta con respecto a la posición de inyección de gas a los 3 flujos usados y en la Figura 33 se muestra la superficie del ojo expuesta en función de la posición de un solo tapón con tres líneas para cada flujo experimentado en este trabajo. Medir el % de área con una foto en un proceso de naturaleza inestable pueda explicar la poca tendencia observada.

### Efecto del tiempo de mezclado respecto a la posición con un tapon abierto

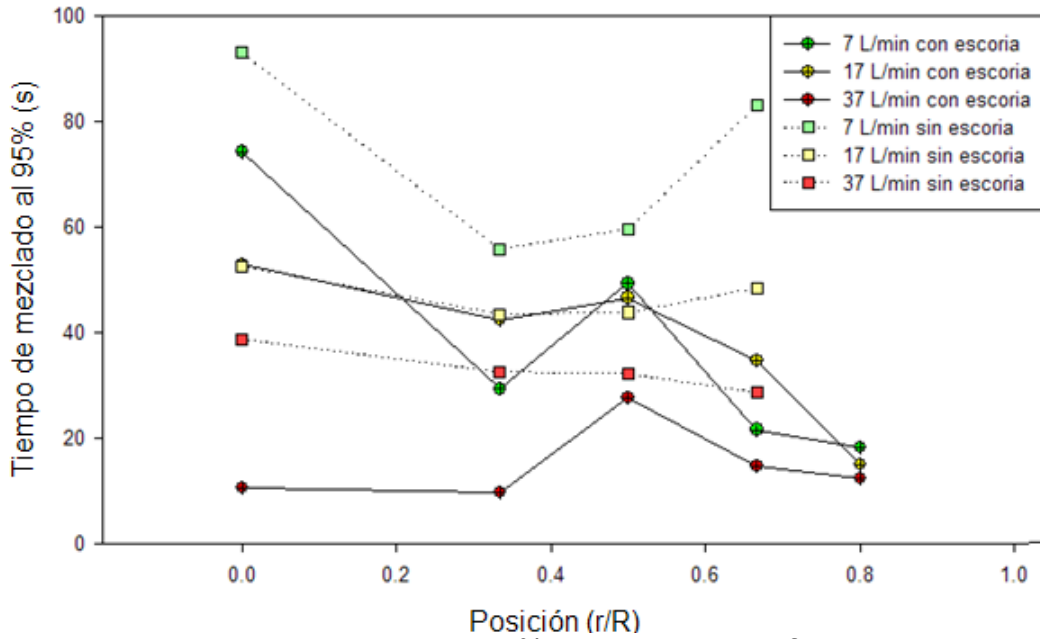


Figura 31. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones (central, 1/3, 1/2, 2/3 y 4/5 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria

### Tiempo de mezclado en función del flujo de gas para un tapón abierto

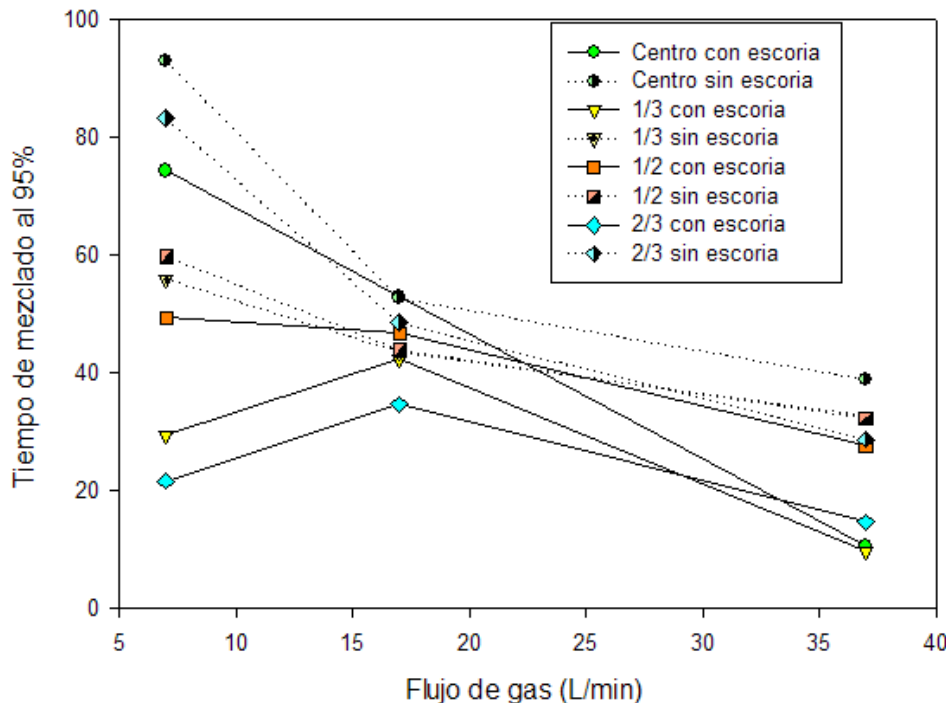


Figura 32. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas (7, 17 y 37 L/min) a diferentes posiciones con escoria y sin escoria

Flujo (L/min)	Superficie central (%)	Superficie a 1/3 R (%)	Superficie a 1/2 R (%)	Superficie a 2/3 R (%)	Superficie a 4/5 R (%)
7	30.31	25.22	20.62	19.46	28.52
17	40.87	35.32	45.75	37.80	54.42
37	48.93	55.14	57.53	61.33	52.41

Tabla 7. Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas

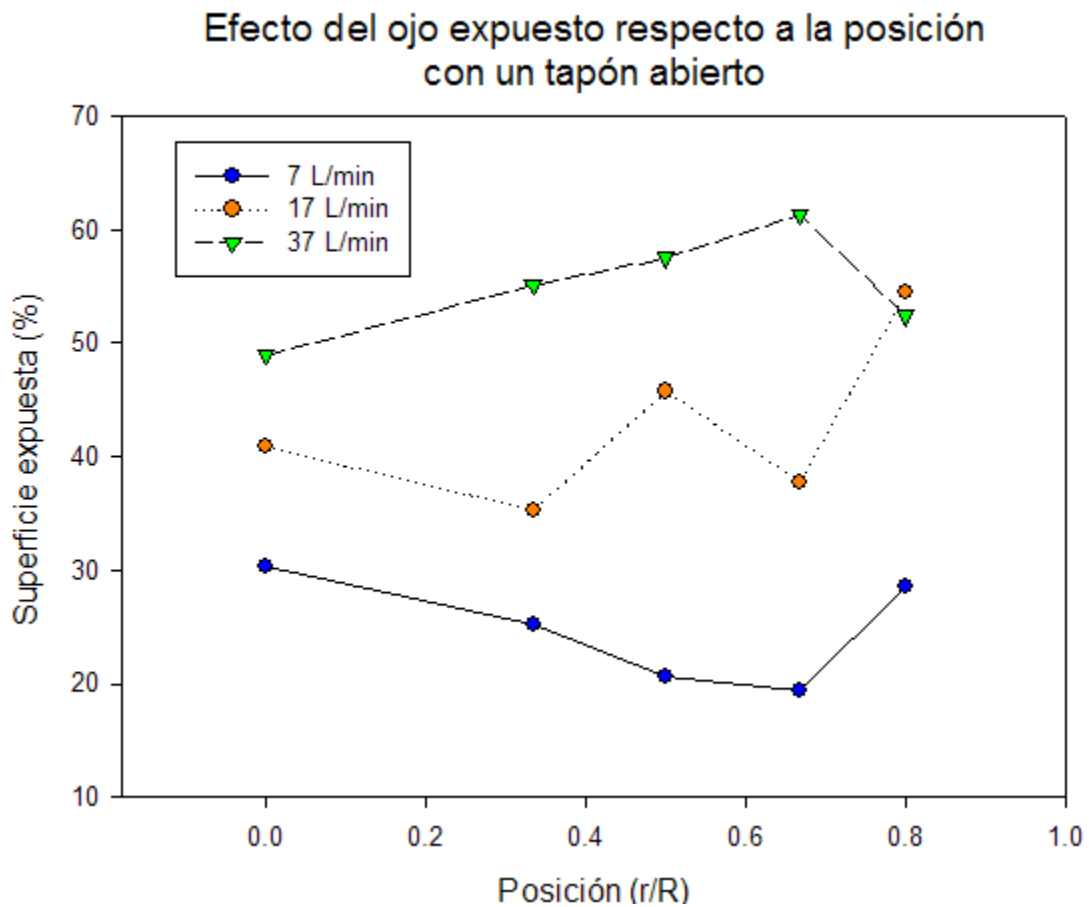


Figura 33. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones (central, 1/3, 1/2, 2/3 y 4/5 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas

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

La Figura 34 ilustra el tiempo de mezclado con dos tapones abiertos en la posición de 1/3 del radio en función del flujo de gas y muestra una tendencia de incremento de tiempo de mezclado conforme se incrementa el flujo.

Este resultado es contrario a lo encontrado con un tapón. Una posible causa para explicar esta contradicción es la presencia ya reportada<sup>9</sup> de 2 circuitos separados de circulación de fluido que retardan el mezclado global cuando el soluto solo puede dispersarse en el circuito en donde fue inyectado y para alcanzar el otro circuito de la olla solo la turbulencia lo permite. Aunado a esta explicación, la capa de aceite sobre la superficie del baño mitiga la agitación y mientras más gruesa es la capa de escoria mayor es la fricción existente entre el aceite y el agua. Esta capa crece al aumentar el flujo de gas porque al haber mayor apertura con el incremento del flujo de gas, el aceite que es desplazado se acumula en menor % de área por lo que crece su espesor.

En este caso las pérdidas de momentum son bastante grandes pues el aceite tiende a volver a cerrar el ojo expuesto y frena el movimiento del líquido. Para el flujo más bajo, el grosor de la capa de aceite no es tanto y la agitación se lleva a cabo de una mejor manera, a diferencia del flujo más alto el cual tiene que vencer una capa mucho más grande de aceite perdiendo momentum. Para este experimento el mejor tiempo de mezclado se logró con un flujo de 7 L/min con un tiempo promedio de mezclado de  $20.66 \pm 0.57$  segundos en contraste nuevamente con los resultados obtenidos previamente<sup>9</sup> donde el mayor tiempo de mezclado se obtuvo para este flujo y fue de  $86.85 \pm 6.07$  segundos y el mayor tiempo de mezclado registrado sorpresivamente se logró para un flujo de gas de 37 L/min y fue de  $55.66 \pm 0.57$  segundos, es decir, más del doble que con flujo bajo contra  $34.5 + 1.59$  segundos obtenidos anteriormente. Estos datos muestran que ahora si se tiene una tendencia de incremento de tiempo de mezclado salvo por los datos obtenidos con un flujo de 7 L/min lo cual nuevamente puede ser debido a error experimental o condiciones adversas en la experimentación

Analizando los ojos expuestos se aprecia que la superficie aumenta de una gran manera al momento de incrementar el flujo con cantidades de 17.61, 48.64 y 60.42% de área de agua expuesta para cada flujo en orden ascendente (ver Tabla 8).

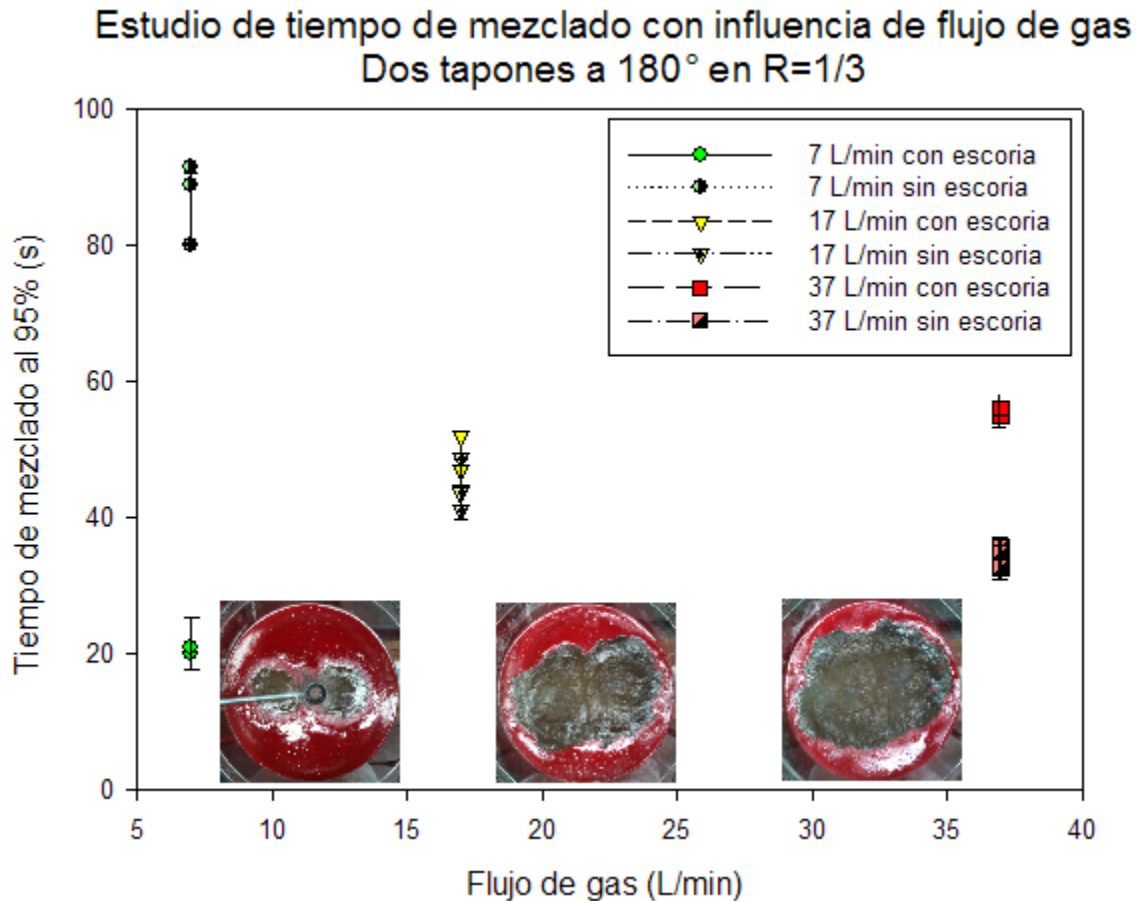


Figura 34. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/3 R con dos tapones abiertos

La Figura 35 ilustra el tiempo de mezclado con dos tapones abiertos en la posición de  $\frac{1}{2}$  del radio en función del flujo de gas mostrando una tendencia muy similar a la obtenida anteriormente sin presencia de escoria durante el mezclado aunque con un incremento de tiempo que se esperaba debido a las pérdidas de momentum realizadas por la fricción del líquido con la capa de aceite. El mayor tiempo de mezclado registrado corresponde al flujo mínimo de 7 L/min y en promedio es de  $205.33 \pm 2.51$  segundos en comparación con los  $59.89 + 4.47$  segundos obtenidos previamente (lo que representa mucho más del triple de

tiempo), en cambio el menor tiempo de mezclado registrado corresponde al flujo de 37 L/min y es de  $74.33 \pm 1.52$  segundos en promedio contra los  $36.55 + 3.66$  segundos obtenidos en experimentación previa<sup>9</sup>. La explicación de este comportamiento es que el momentum no se está perdiendo tanto al inyectar el gas en esta posición ya que se incrementa la separación de ambas plumas (respecto a la posición anterior de 1/3 de R). Los ojos expuestos son de 16.65, 54.36 y 66.13% para cada flujo (ver Tabla 8).

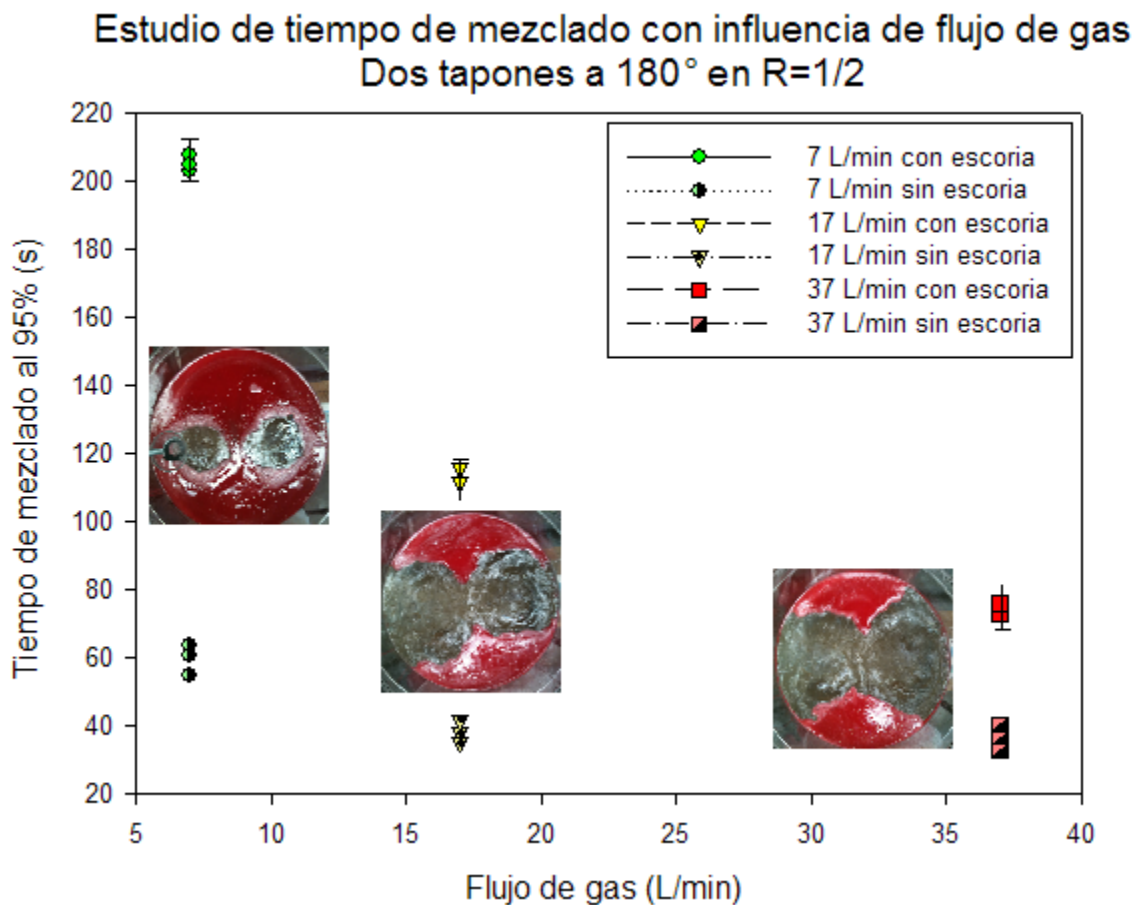


Figura 35. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/2 R con dos tapones abiertos

La Figura 36 ilustra el tiempo de mezclado con dos tapones abiertos en la posición de 2/3 del radio en función del flujo de gas y muestra un comportamiento similar al descrito anteriormente, en este caso el mayor tiempo de mezclado nuevamente

fue registrado por el flujo de 7 L/min y fue de  $135 \pm 1$  segundo en comparación con  $61.40 \pm 5.51$  segundos obtenidos anteriormente en experimentos de mezclado sin aceite<sup>9</sup> y el menor tiempo de mezclado fue registrado con un flujo de 37 L/min y fue de  $51.66 \pm 2.08$  segundos con respecto a los  $37.41 \pm 3.58$  segundos obtenidos anteriormente. Nuevamente se obtuvieron resultados que resultan coherentes cuando se analizan pues los tiempos de mezclado aumentaron cuando se agregó la capa de aceite en comparación con los resultados obtenidos sin la capa de escoria debido a las pérdidas de momentum que ocasiona la fricción entre la capa de aceite y el agua, por otro lado si se observan las imágenes de mezclado con dos tapones obtenidas por el modelo matemático<sup>16</sup> la capa de aceite no propicia una pérdida muy alta de momentum pues los circuitos de flujo quedan prácticamente libres de aceite al formarse una especie de “8” en los ojos.

Si se analizan los ojos expuestos se aprecia que en todos los casos que los ojos no son circulares y se encuentran pegados a la pared del reactor por la posición en la que se inyecta el gas. Nuevamente se observa que el tamaño de los ojos es directamente proporcional al flujo de gas inyectado.

De acuerdo a la gráfica se sigue manteniendo la tendencia que al aumentar el flujo de gas inyectado el tiempo de mezclado disminuye pero el tamaño del ojo expuesto aumenta de manera significativa con 18.07, 53.61 y 63.65% respectivamente, tal y como se ve en la Tabla 8 (muchacha área expuesta para flujos altos y una baja superficie para el flujo de 7 L/min).



### Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas Dos tapones a 180° en R=2/3

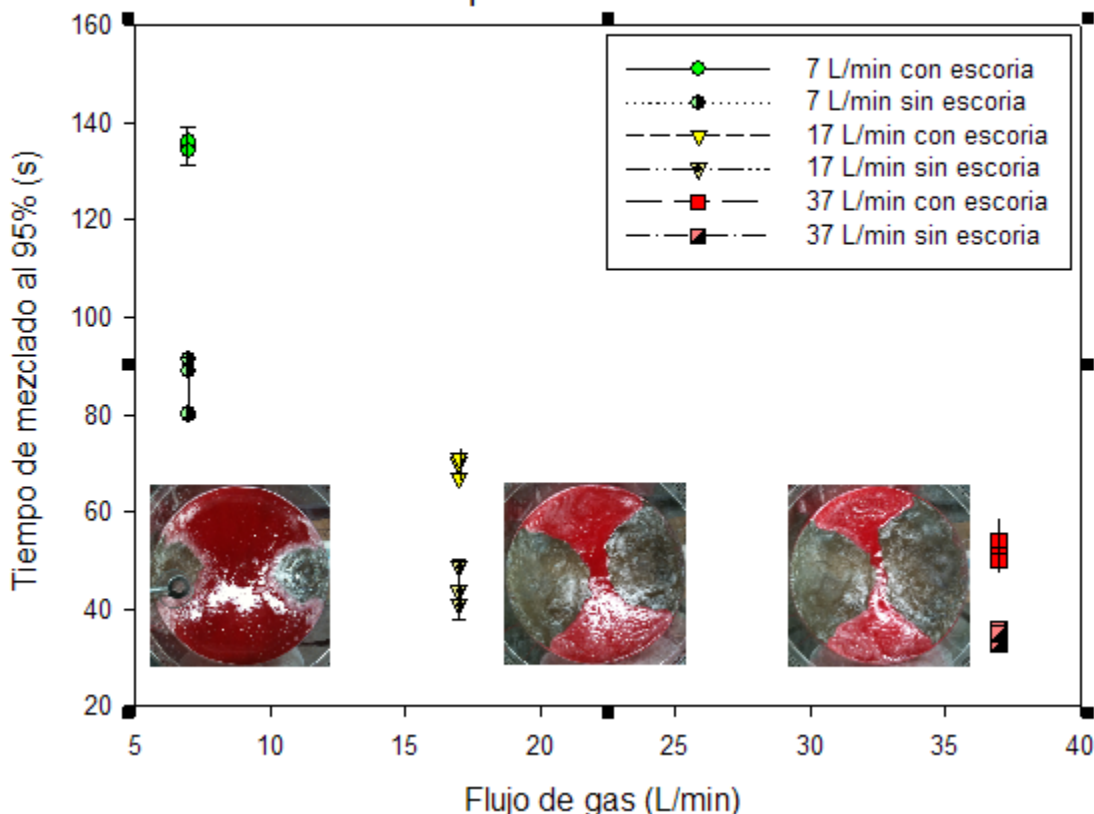


Figura 36. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 2/3 R con dos tapones abiertos

La Figura 37 muestra el estudio del tiempo de mezclado para dos tapones abiertos en 4/5 del radio en función del flujo de gas. Nuevamente no se cuentan con resultados previos para comparar resultados pero se realizaron los experimentos para medir la cantidad de superficie expuesta por los ojos durante la agitación.

Esta posición no resulta adecuada en la práctica pues en un reactor real puede desgastar el refractario de manera significativa. El menor tiempo de mezclado registrado es de  $42.33 \pm 1.52$  segundos correspondiente al flujo de 37 L/min y el mayor tiempo de mezclado registrado es de  $126.33 \pm 1.5$  segundos. La superficie expuesta es de 19.35, 57.39 y 63.65% para los flujos respectivos (ver Tabla 8).

## Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas Dos tapones a 180° en R=4/5

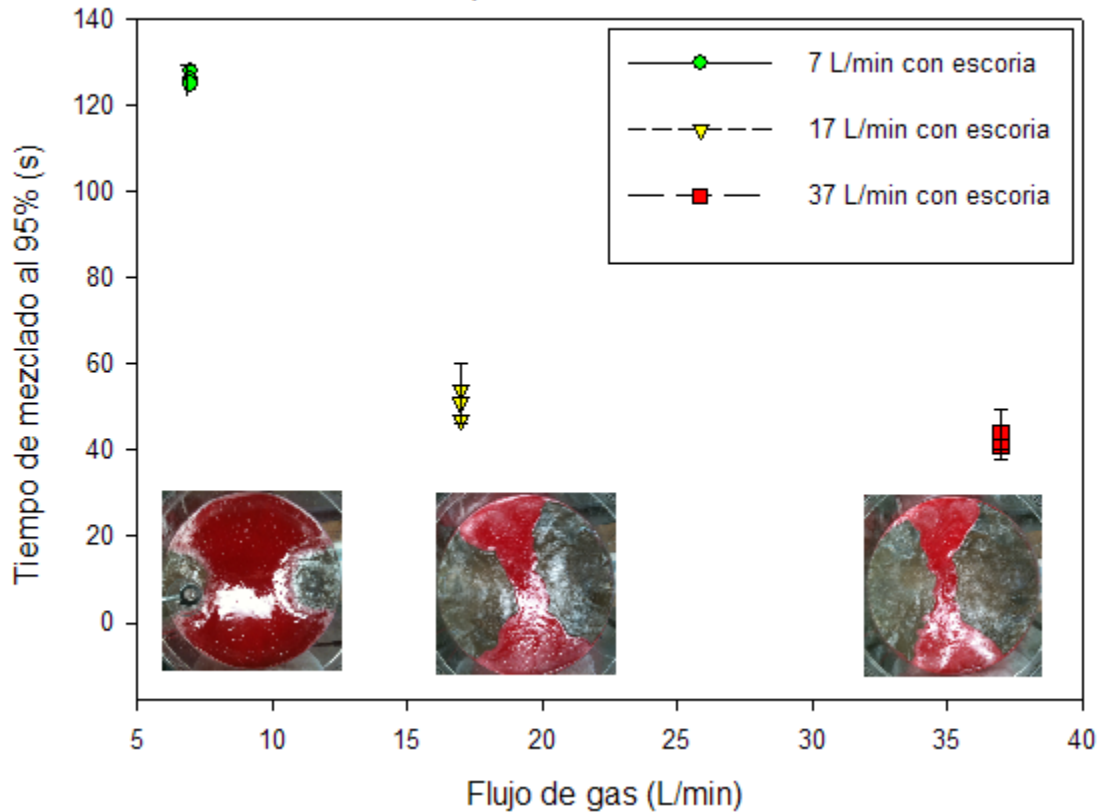


Figura 37. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 4/5 R con dos tapones abiertos

La Figura 38 muestra de manera condensada los tiempos de mezclado al 95% respecto a la posición de inyección de gas con los respectivos flujos. El mejor tiempo de mezclado lo registra la posición de 1/3 del radio para el flujo de 7 L/min el cual fue de 20.66 segundos en promedio aunque luego registra un incremento con respecto al tiempo de mezclado el cual se sostiene y ese resultado en particular resultó dudoso pues no el tiempo de mezclado disminuyó con respecto a las pruebas realizadas anteriormente en lugar de aumentar. El segundo mejor tiempo se presenta en la posición de 1/3 del radio pero con un flujo de 17 L/min y fue de 47.66 segundos en promedio, el cual sí presenta un incremento de tiempo al realizar la agitación con respecto a los experimentos anteriores. Este flujo es relativamente bajo y la posición no influye de manera perjudicial en el refractario de un horno real.

La misma tendencia de incremento de tiempo se observa con más claridad en la Figura 39 donde se ilustra el tiempo de mezclado al 95% vs el flujo de gas a posición constante (1/3, 1/2, 2/3 y 4/5), nuevamente las curvas presentan una tendencia similar (salvo por el dato de 7 L/min en la posición de 1/3 R) con su respectivo incremento de tiempo debido a pérdidas de momentum causadas por la capa de aceite que también disminuye conforme se incrementa el flujo y la turbulencia en el reactor es mucho mayor.

Por otro lado, el área expuesta por los ojos se presenta en la Tabla 8 y su comportamiento con respecto a la posición se muestra en la Figura 40 en este caso los flujos de 17 L/min y 37 L/min exponen más de la mitad de superficie.

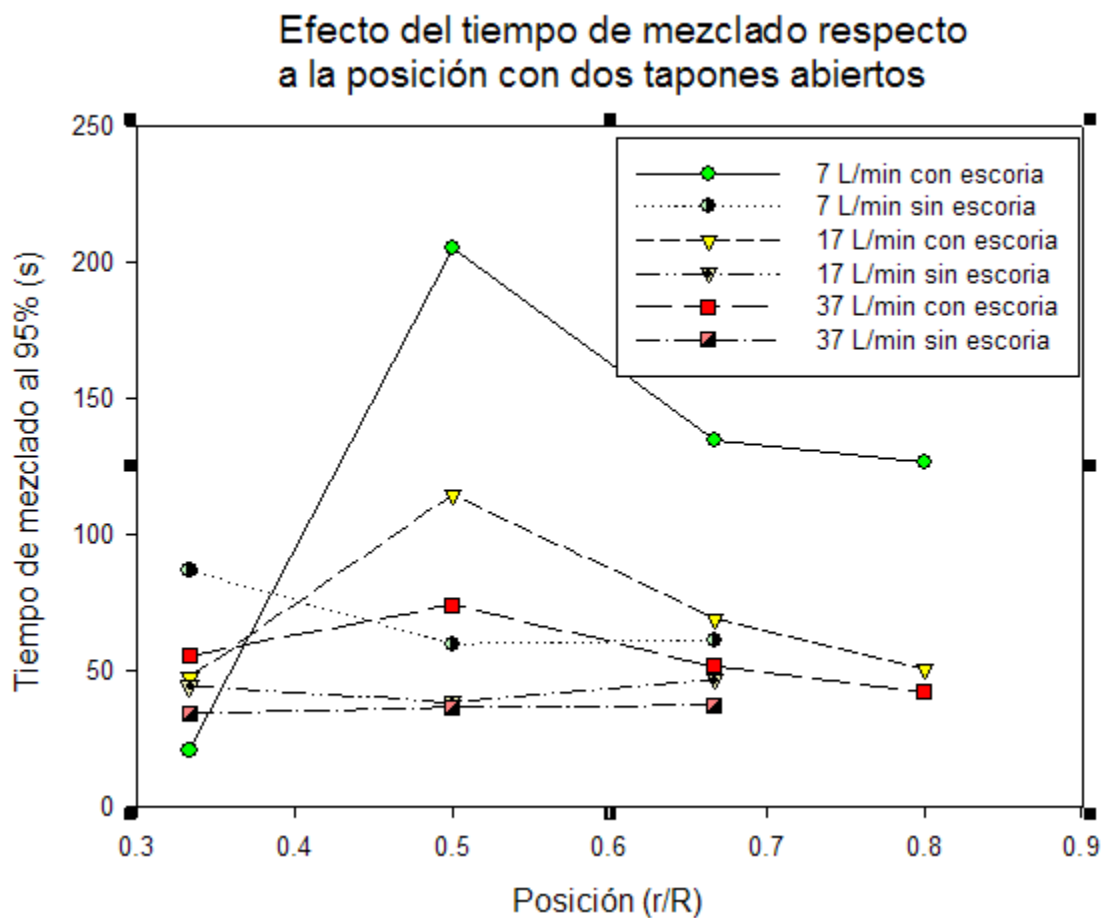


Figura 38. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones (1/3, 1/2, 2/3 y 4/5 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria

### Tiempo de mezclado en función del flujo de gas para dos tapones abiertos

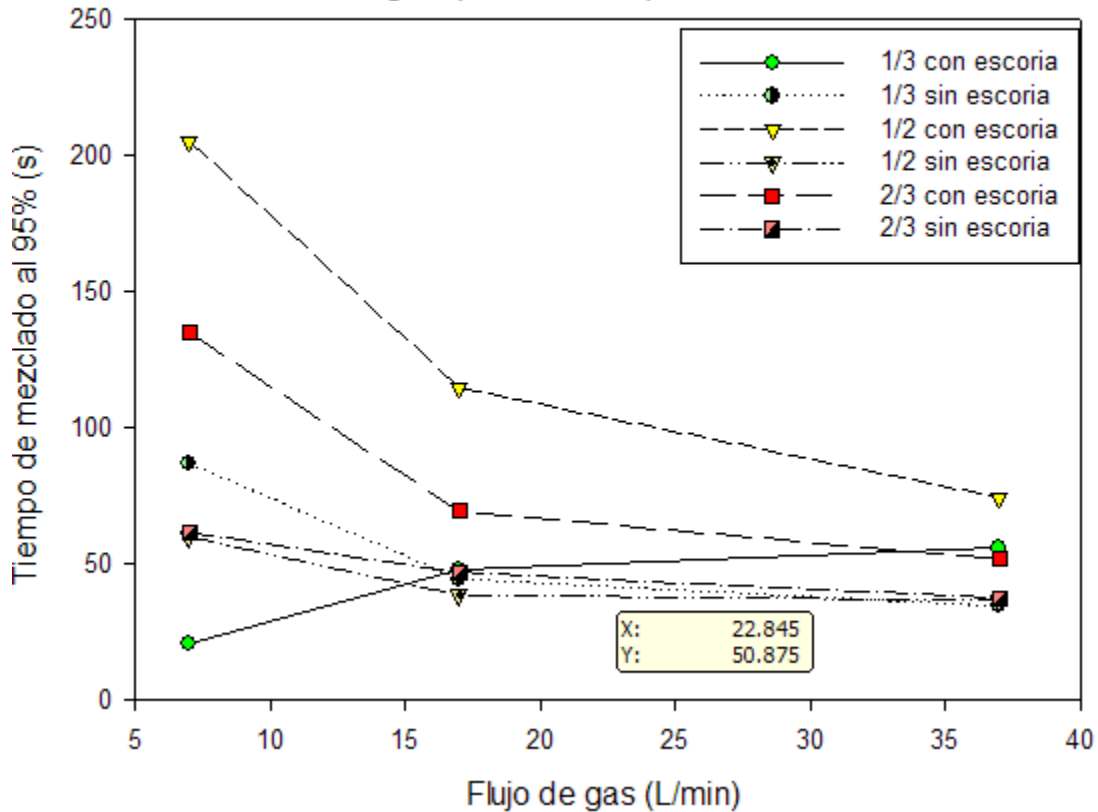


Figura 39. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas (7, 17 y 37 L/min) a diferentes posiciones con escoria y sin escoria

Flujo (L/min)	Superficie a 1/3 R (%)	Superficie a 1/2 R (%)	Superficie a 2/3 R (%)	Superficie a 4/5 R (%)
7	17.61	16.65	18.07	19.35
17	48.64	54.36	53.61	57.39
37	60.42	66.13	63.65	63.65

Tabla 8. Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas

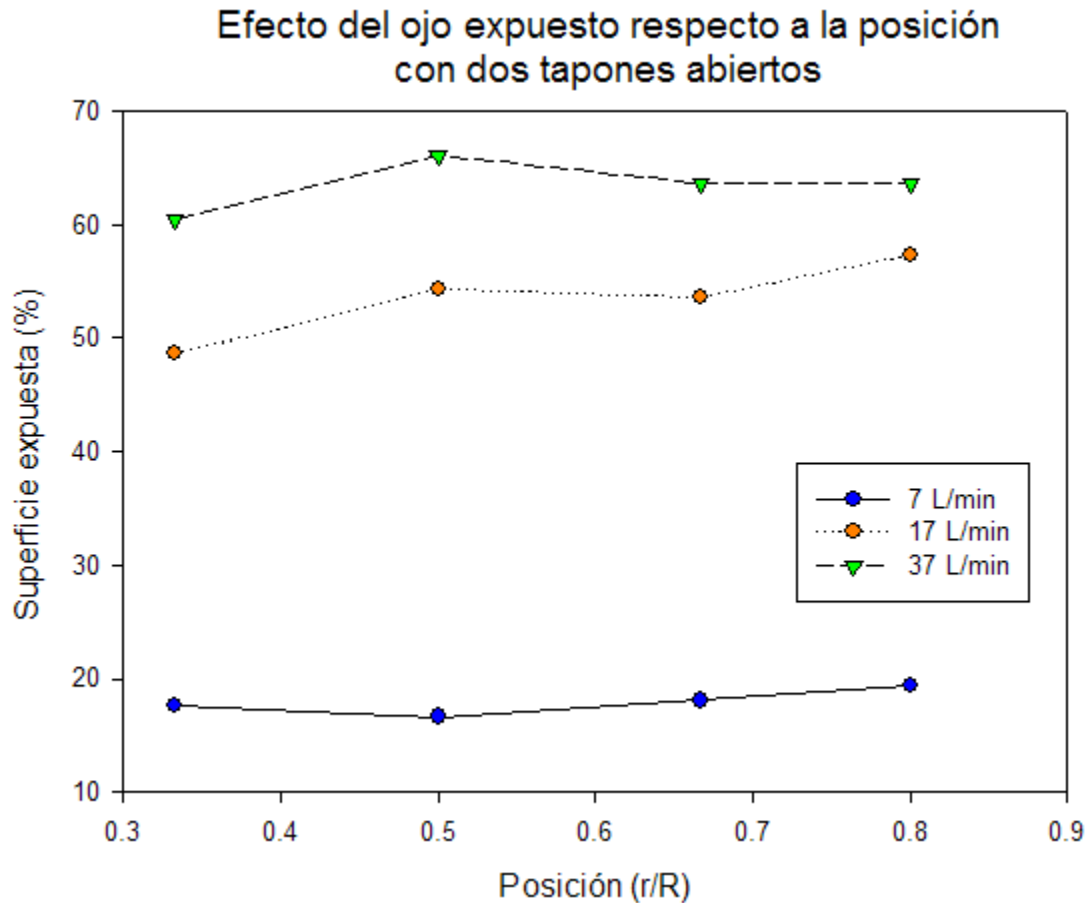


Figura 40. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones (1/3, 1/2, 2/3 y 4/5 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas

#### 4.2.3 Tres tapones abiertos localizados a 120° uno del otro

La Figura 41 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas con 3 tapones abiertos a 120° uno del otro en la posición de 1/3 del radio. El menor tiempo de mezclado registrado corresponde a un flujo de 17 L/min con  $70.33 \pm 1.52$  segundos en promedio mientras que el mayor tiempo registrado lo presenta el flujo de 7 L/min con  $129.66 \pm 1.63$  segundos en promedio. Los tiempos obtenidos anteriormente<sup>9</sup> son de  $84.77 + 3.1$  segundos para el flujo de 7 L/min y de  $31.46 + 1.28$  segundos para el flujo de 40 L/min. Los resultados obtenidos suenan coherentes aunque las gráficas son diferentes cuando se comparan con los resultados previos, porque no son iguales pero se presenta la diferencia de tiempos esperada por las pérdidas de momentum generada por la capa de aceite.

El tiempo de mezclado aumentó no solo debido a la presencia de la capa de aceite la cual frena la agitación sino que ahora se tienen 3 circuitos de recirculación que interfieren entre sí al realizar el mezclado, la cantidad de gas se distribuye de manera homogénea por lo que se inyecta una menor cantidad de gas en cada tapón por lo que el arrastre entre el agua y el aceite se ve reducido, ya que el momentum que produce la pluma en cada tapón está dividido entre tres en comparación con la inyección con un solo tapón. Todos estos fenómenos ocasionan una pérdida importante de momentum al realizar el mezclado.

La superficie expuesta también es mayor debido a la presencia de 3 ojos, los cuales exponen una cantidad de material correspondiente a 22.98, 39.99 y 52.87% para los flujos correspondientes (Ver Tabla 9).

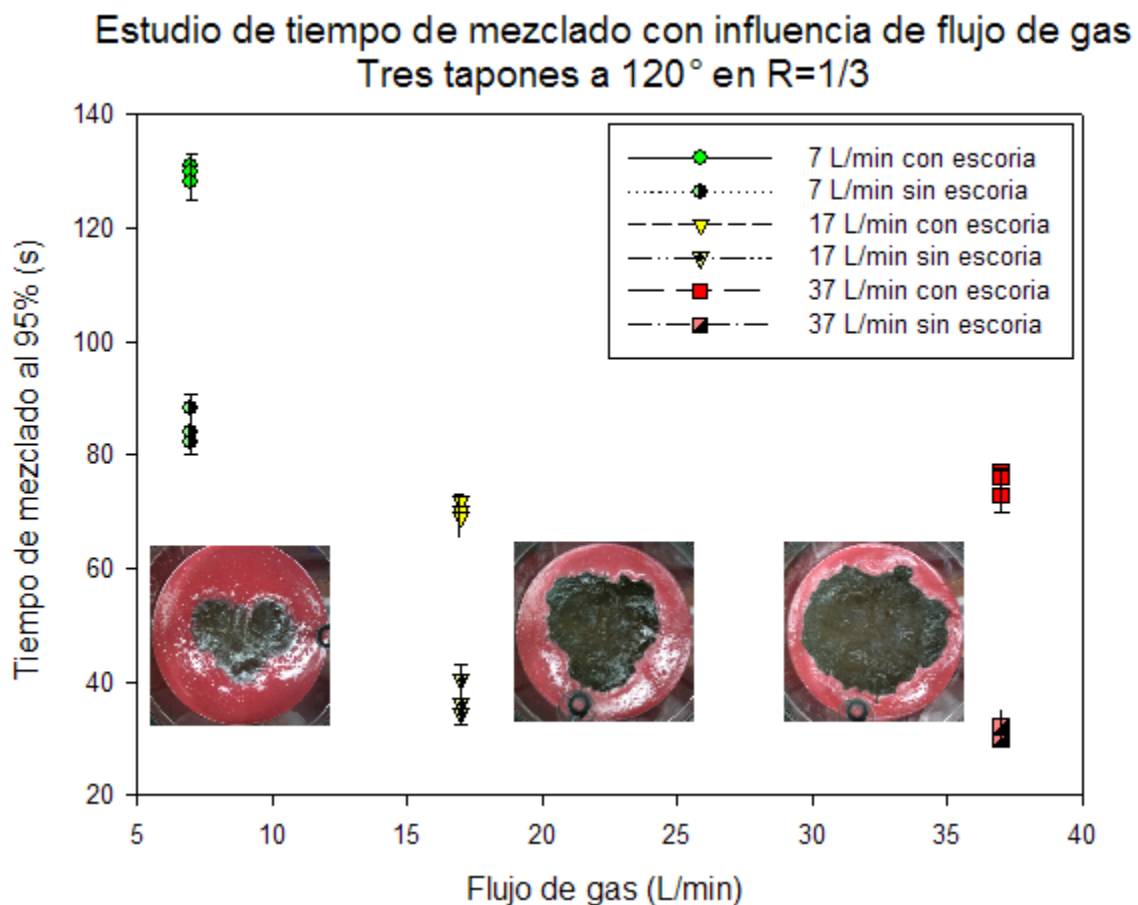


Figura 41. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/3 R con tres tapones abiertos

La Figura 42 muestra el tiempo de mezclado en función del flujo de gas con tres tapones en  $2/3$  del radio. En este caso los resultados del tiempo de mezclado medidos presentan una gran dispersión de valores. Esto se puede explicar porque se tienen 3 circuitos de recirculación los cuales al momento de inyectar el trazador distribuyen de manera turbulenta al mismo en todo el reactor y las mediciones resultan muy erráticas, caóticas e irregulares por la turbulencia interactuando entre sí al realizar la transferencia de masa, exactamente el mismo comportamiento se observa en los resultados obtenidos en experimentos sin la capa de aceite<sup>9</sup>.

El menor tiempo registrado es de  $54.33 \pm 3.05$  segundos y corresponde al flujo de 17 L/min mientras que el mayor tiempo fue obtenido al inyectar 7 L/min y fue de  $64 \pm 5$  segundos. Se puede observar que el tiempo de mezclado es muy similar en los tres flujos. Al comparar los tiempos se tiene que el mayor tiempo de mezclado es de  $53.69 + 3.44$  segundos y corresponde al flujo de 7 L/min, con respecto al mayor tiempo de mezclado se tiene que es de  $47.24 + 2.85$  segundos obtenido para el flujo de 37 L/min.

Un factor clave en este sistema en particular es la capa de aceite, la cual ocasiona que no siga la misma tendencia que las gráficas obtenidas previamente además de frenar de manera significativa el mezclado con un flujo de 37 L/min y es porque ésta se desplaza completamente a los bordes del reactor desplazando los chorros ligeramente hacia el centro, a diferencia de los otros dos flujos en los que se presenta un poco de aceite en el centro del reactor y el chorro asciende de una manera más libre. Los valores de los porcentajes de áreas de superficie libre expuestas a la atmósfera se presentan en la Tabla 9.

## Estudio de tiempo de mezclado con influencia de flujo de gas Tres tapones a 120° en R=2/3

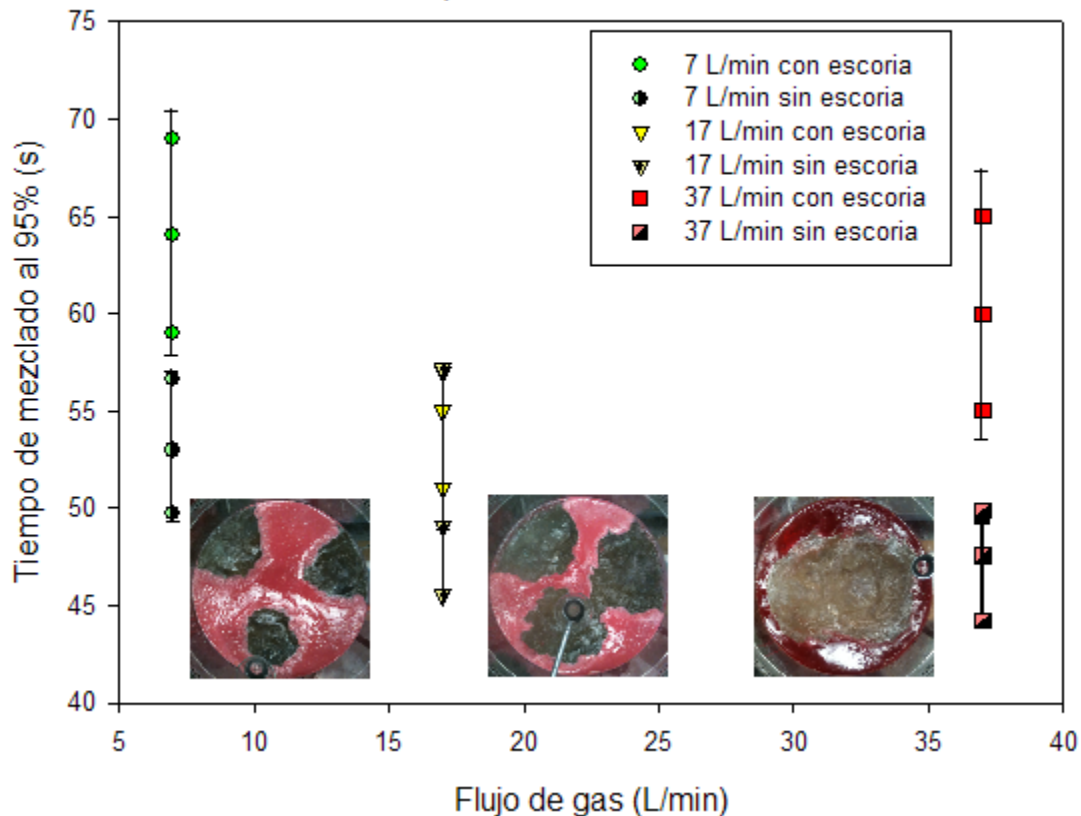


Figura 42. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 2/3 R con tres tapones abiertos

La Figura 43 muestra de forma condensada la dependencia del tiempo de mezclado respecto a la posición de inyección con tres tapones a diferentes flujos de gas. Se observa una tendencia general a disminuir el tiempo de mezclado al inyectar de 1/3 de R a 2/3 R, lo que sugiere que la posición ideal para mezclar es a 2/3 del radio aunque la disminución de los tiempos de mezclado es relativamente baja con respecto a la variación obtenida al variar el flujo. En contraste con este resultado, la mejor posición de acuerdo con los datos obtenidos en experimentos anteriores<sup>9</sup> es en 1/3 R con un flujo de 17 L/min y 37 L/min. Curiosamente en ambos resultados los tiempos son muy similares en la posición de 2/3 R y se tiene un incremento del tiempo de mezclado debido al freno impuesto por la capa de aceite.



El flujo que mantuvo una tendencia muy similar es de 17 L/min. De acuerdo a los resultados este flujo de gas mezcla de manera eficiente, pues con él se obtuvo el menor tiempo en ambos casos y no se gasta tanta cantidad de gas evitando así una emulsificación del aceite sin sobreexponer el baño a la atmósfera. Sin embargo, el gasto de gas es mucho menor para el flujo de 7 L/min y el tiempo de mezclado no es muy distinto al del flujo de 17 L/min, por lo que con 3 tapones podría sugerirse inyectar con el flujo bajo de gas.

La misma tendencia de incremento de tiempo debido a la capa de aceite se observa con más claridad en la Figura 44 donde se ilustra el tiempo de mezclado al 95% vs el flujo de gas a posición constante ( $1/3$ ,  $1/2$ ,  $2/3$  y  $4/5$ ), el único valor que difiere es el de 17 L/min en posición de  $1/3$ , no es extraño debido a que la capa de aceite altera totalmente el comportamiento del mezclado.

La Tabla 9 muestra la cantidad de superficie expuesta por los ojos en los 3 flujos usados en las dos posiciones registradas y la Figura 45 muestra la tendencia que presentan dichos ojos con respecto al flujo.

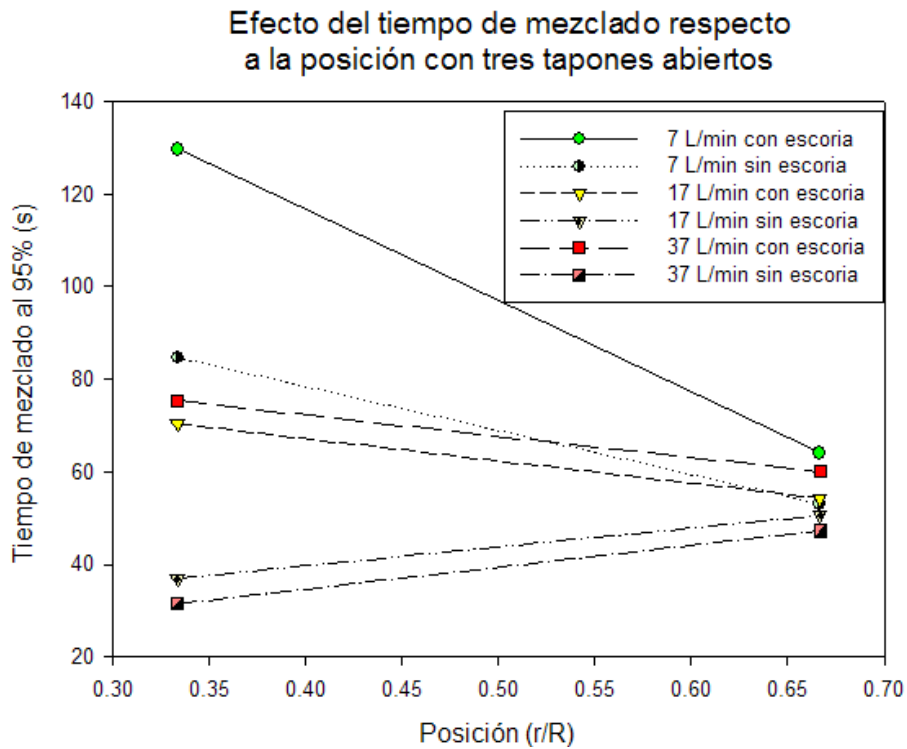


Figura 43. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones (1/3 y 2/3 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria

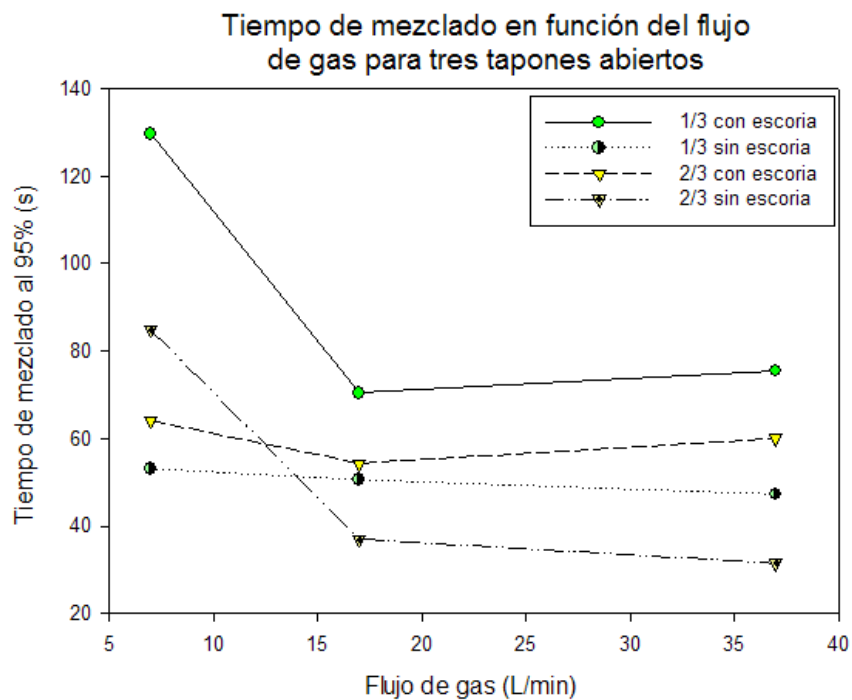


Figura 44. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas (7, 17 y 37 L/min) a diferentes posiciones con escoria y sin escoria

Flujo (L/min)	Superficie a 1/3 R (%)	Superficie a 2/3 R (%)
7	22.98	33.49
17	39.99	56.53
37	52.87	60.04

Tabla 9. Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas

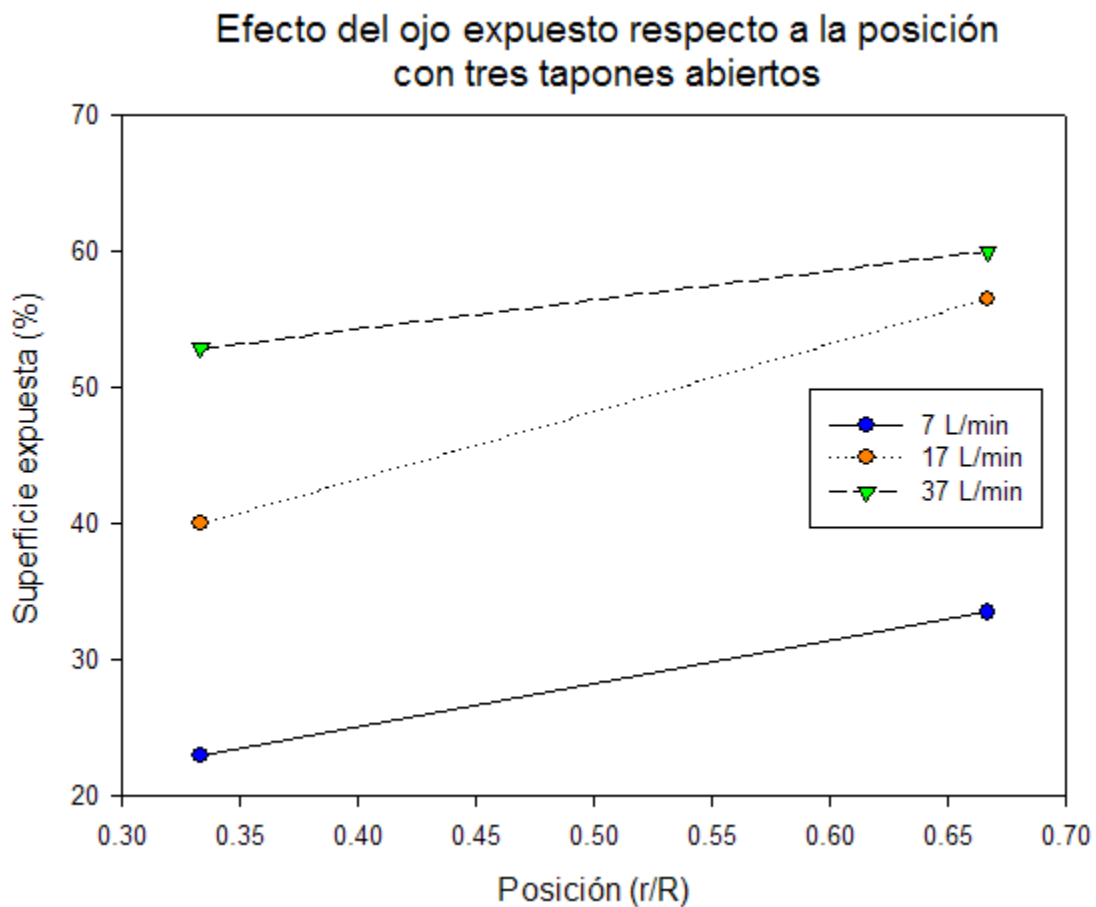


Figura 45. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones (1/3 y 2/3 del radio) a diferentes flujos de inyección de gas

## Capítulo 5. Conclusiones

- El tamaño de los ojos expuestos es directamente proporcional al flujo de gas inyectado.
- Debido a diferencias sumamente marcadas al comparar los resultados sin escoria con los obtenidos en este trabajo, se puede decir que los resultados para un solo tapón abierto salieron erróneos y se deben estudiar más a fondo el mezclado con un tapón y presencia de escoria.
- Para 2 y 3 tapones se aprecia que las tendencias son similares, es decir, disminuye el tiempo de mezclado con el aumento en la posición de inyección y con el aumento en flujo de gas. Los resultados con 7 L/min no presentan esta tendencia por lo que se presume errores en la medición.
- La capa de aceite altera de manera significativa la manera de llevar a cabo la agitación con 3 tapones abiertos, ya que los tiempos de mezclado aumentan significativamente a los obtenidos sin aceite, lo cual es ocasionado por la pérdida de momentum causada por la fricción entre las fases.
- En general, la tendencia que se tuvo fue la disminución del tiempo de mezclado ante el incremento de flujo de gas inyectado, pues la turbulencia incrementa significativamente con el incremento de burbujas en el baño líquido.
- En general, los mejores tiempos de mezclado se obtienen con flujos de 37 L/min pero estos flujos generan una alta emulsificación del aceite (la cual también podría presentarse en la escoria en los hornos reales, para lo cual habría que realizar similitudes de tensión superficial con el número de Weber) pero propician un gasto de gas demasiado alto y los ojos exponen mucha superficie al ambiente. Entonces, el flujo de gas recomendado es de 17 L/min, con el que se ahorraría gas con buen mezclado y sin exponer una gran cantidad de superficie al ambiente.
- Los peores tiempos de mezclado se obtuvieron generalmente para flujos de 7 L/min y esto es debido a una pobre agitación que generan las burbujas

presentes, las cuales arrastran muy poco líquido generando una pobre convección y poca turbulencia.

- Se deben realizar estudios más a fondo para disminuir los errores experimentales, principalmente para el flujo insuflado a través de un tapón. Quizá sea conveniente realizar un cambio de agua para garantizar que la salmuera sea poca y la densidad del agua permanezca inalterada.

<b>Indice de figuras</b>	<b>Pág</b>
Figura 1. Esquema del convertidor Bessemer	8
Figura 2. Rutas de producción de acero	9
Figura 3. Disminución de los elementos presentes en el acero con respecto al tiempo	10
Figura 4. Evolución de los contenidos del acero en ppm	10
Figura 5. Producción mundial de acero (mmt)	11
Figura 6. Capacidad de utilización del acero en el mundo	12
Figura 7. Principales países productores de acero en el mundo de acuerdo a Worldsteel	13
Figura 8. Principales países productores de acero en el mundo de acuerdo a CANACERO	14
Figura 9. Principales empresas productoras de acero en el mundo	14
Figura 10. Presencia geográfica del acero en México	15
Figura 11. Esquema del horno olla con inyección de gas por el fondo	16
Figura 12. Zonas que caracterizan la distribución de burbujas en el baño líquido	20
Figura 13. Esquema utilizado para simular el mezclado en presencia de escoria	20

Figura 14. Vista superior (a) y vista lateral (b) del ojo en un modelo de agua-aceite	21
Figura 15. Esquema de las interacciones entre la pluma y la fase superior del líquido y formación del ojo en el baño líquido	21
Figura 16. Influencia del tamaño del modelo en la medición del tiempo de mezclado	23
Figura 17. Efecto en los tiempos de mezclado en tres diferentes puntos de medición	23
Figura 18. Perfiles de velocidad usando un solo tapón en diferentes posiciones radiales con un flujo de gas de 0.225 L/s	25
Figura 19. Perfiles de velocidad en el líquido con diferente número de tapones abiertos localizados en 2/3 R con un flujo de gas de 0.225 L/s	25
Figura 20. Perfiles de velocidad en el líquido inyectando diferentes flujos de gas con dos tapones abiertos localizados en 2/3 R	26
Figura 21. Instalación del modelo físico y accesorios usados	29
Figura 22. Funcionamiento de la instalación durante un experimento	30
Figura 23. Esquema detallado de la instalación del modelo físico	31
Figura 24. Esquema de posición con un tapón abierto (a), dos tapones abiertos (b) y tres tapones abiertos (c)	35
Figura 25. Ejemplo de gráfico de concentración vs tiempo usado para determinar el tiempo de mezclado y el ojo presente en el experimento	39
Figura 26. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en la posición central	41
Figura 27. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 1/3 R	42

Figura 28. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{1}{2}$ R	44
Figura 29. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{2}{3}$ R	46
Figura 30. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{4}{5}$ R	47
Figura 31. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones y a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria	49
Figura 32. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas a diferentes posiciones con escoria y sin escoria	49
Figura 33. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones a diferentes flujos de inyección de gas	50
Figura 34. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{1}{3}$ R con dos tapones abiertos	52
Figura 35. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{1}{2}$ R con dos tapones abiertos	53
Figura 36. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{2}{3}$ R con dos tapones abiertos	55
Figura 37. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{4}{5}$ R con dos tapones abiertos	56
Figura 38. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones y a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria	57
Figura 39. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas a diferentes posiciones con escoria y sin escoria	58
Figura 40. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones a diferentes flujos de inyección de gas	59
Figura 41. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en $\frac{1}{3}$ R con tres tapones abiertos	60

Figura 42. Tiempo de mezclado en función del flujo de gas en 2/3 R con tres tapones abiertos	62
Figura 43. Tiempo de mezclado al 95% respecto a las diferentes posiciones y a diferentes flujos de inyección de gas con escoria y sin escoria	64
Figura 44. Tiempo de mezclado al 95% respecto a los diferentes flujos de gas a diferentes posiciones con escoria y sin escoria	64
Figura 45. Superficie expuesta del ojo con respecto a las diferentes posiciones a diferentes flujos de inyección de gas	65

## **Índice de tablas**

## **Pág**

Tabla 1. Evolución histórica de la siderurgia	7
Tabla 2. Datos de densidad y viscosidad reportados	19
Tabla 3. Reportes de varios investigadores en las que miden la correlación del tiempo de mezclado	22
Tabla 4. Datos de escalamiento dimensional del modelo físico	32
Tabla 5. Escalamiento dinámico usado	33
Tabla 6. Matriz de experimentos usada para este trabajo	34
Tabla 7. Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas	50
Tabla 8. Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas	58
Tabla 9 Superficie expuesta en promedio variando posición con respecto al flujo de gas	65



## Bibliografía

1. Birat, J. P. Sustainable steelmaking paradigms for growth and development in the early 21<sup>st</sup> century. La revue de métallurgie, Enero 2001 pp.19-28
2. Koichi Endoh. Recent Advances and future prospects of refining technology. Nippon steel technical report. Abril 1994 pp 6-8
3. Mazumdar, D. Kim, H. B. and Guthrie, R. I. L. Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study, Ironmaking and Steelmaking 2000 Vol. 27 No. 4 2007 pp 305-308
4. Mazumdar, D. Guthrie, R. I. L. The physical and mathematical modeling of gas stirred ladle systems. ISIJ International, Vol 35, No.1 1995 pp 1-10
5. Smirnov, A.N. Pismarev, K. E. Kuberskiy, S. V. Efficiency of durance slag cutoff in the process of steel reladle. Metallurgical and Mining Industry 2010, Vol 2 No.1 pp. 1-5
6. Peranandhanthan, N. Mazumdar, D. Modeling of Slag Eye Area in Argon Stirred Ladles, ISIJ International, Vol. 50 No. 11 2010 pp 1623-1627
7. Li, B. Yin, H. Zhou C.Q. Tsukihashi, F. Modeling of three-phase flows and behavior of Slag/Steel interface in an Argon Gas Stirred Ladle, ISIJ international, Vol. 48 No. 12 2008 pp 1706-1710
8. Orta Sánchez Israel. Tesis Licenciatura: Construcción de un modelo físico de horno olla para la refinación secundaria del acero. Facultad de Química, UNAM, 2008.
9. Morua Ramírez Miguel Ángel. Tesis Licenciatura: Estudio experimental de mezclado en ollas agitadas con gas asistido por modelación física. Facultad de Química, UNAM, 2010.
10. Han, J.W. Heo, S.H. Kam, D.H. Song H.S. Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer-Approach by Numerical Simulation and Water Model Experiments, ISIJ International, Vol. 41 No 10 2001 pp 1165-1170

11. Pisharody, K.K. Irons, G.A. Modeling of slag eye formation over a metal bath due to gas bubbling, Metallurgical and Materials Transactions, Vol 37B 2006 pp 1-9
12. Yamashita, S. Miyamoto, K. Iguchi, M. Zeze, M. Model Experiments on the Mixing Time in a Bottom Blown Bath Covered with Top Slag, ISIJ International Vol. 43, No. 11 2003 pp 1858-1860
13. Mazumdar, N. Mahadevan, A. Mazumdar, D. Impact of Ladle Design on Bath Mixing, ISIJ International Vol. 45, No. 12 pp 1940-1942
14. Guo, D. Irons, G.A. A Water model and numerical study of the spout height in a gas-stirred vessel, Metallurgical and Materials Transactions, Vol 33B 2002, pp 377-381
15. Mandal, J. Patil, S. Madan, M. Mazumdar, D. Mixing time and correlation for ladles stirred with dual porous plugs. Metallurgical and materials Transactions, Vol. 36B 2005, pp 479-483
16. Ramírez Argáez Marco Aurelio. Numerical Simulation of Fluid Flow and Mixing in Gas-Stirred Ladles. Materials and Manufacturing processes. 23; pp 59-68. 2008

### **Páginas de Internet**

17. <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=189&pageid=2081272044>
18. <http://www.worldsteel.org/?action=programs&id=65&about=1>
19. <http://www.tutorvista.com/content/chemistry/chemistry-ii/chemical-compounds/steel.php>
20. [www.canacero.gob.mx](http://www.canacero.gob.mx)
21. <http://www.bardahl.com.mx/enterprise.do?action=getCategProdCateg&idContent=6301&hn=null&hi=null>