



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Modelado Físico de la Fluidinámica durante la
desgasificación de Al por la Técnica del Rotor-
Inyector**

Tesis

**Que para obtener el título de
Ingeniero Químico Metalúrgico**

Presenta:

Ivan Robles Flores



Facultad de Química "UNAM"

México D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres

Esta tesis se la dedico a mis padres, que han sido un apoyo fundamental y motivo principal para triunfar en la vida.

A mi madre querida Victoria que siempre ha estado a mi lado, escuchándome y comprendiéndome durante cada etapa de mi vida.

A mi padre Fausto que me ha heredado tres cosas muy importantes en mi vida: mis estudios, enseñarme a trabajar y ha nunca darme por vencido por mas difícil que sea el camino, siempre seguir firmes y adelante hueste de la fe sin temor alguno que JESUS nos ve.

A mis tías

A mi tía Inés que siempre me ha brindado su apoyo incondicional en mis estudios.

A mi tía Malena que siempre ha estado a mi lado y me ha visto crecer y quien ha tenido la ardua labor de ser un buen ejemplo a sus hijos y nietos de lo que es ser una persona trabajadora, ordenada y limpia.

A mis compañeros de carrera

Lucha que siempre me ha brindado su amistad incondicional y quien siempre me ha escuchado y dado buenos consejos, a Juan Solórzano por su amistad y apoyo en mi tesis siempre dando una buena opinión, a Eudoxio por su compañía y ayuda en mis dudas, a mi tocayo por su ayuda indispensable para la realización de este trabajo y además de ser un buen compañero y un buen amigo, a Daniel Maldonado por su inagotable entusiasmo y una actitud siempre positiva hacia la vida.

A mis mejores amigos

Juan Del Pilar, Adán y Braulio con los cuales conviví y compartí la mayoría de mi tiempo en la carrera, logrando forjar una amistad entrañable.

Al Dr. Marco Aurelio

Quien siempre se ha preocupado por dar lo mejor de si, tanto como profesor y como persona, enseñando una educación de calidad y principalmente por confiar en mi.

A Pedro Cabrera Juárez

Por ser una pieza clave en este trabajo, al cual siempre le dedico esfuerzo y esmero, siempre ingeniando ideas y soluciones.

A CONACyT por su apoyo al proyecto 60033. Modelación matemática de la desgasificación de aluminio liquido por medio de purgado de gases, con la técnica del rotor inyector.

Índice General		página
1	Capítulo I. Antecedentes	1
1.1	Importancia del aluminio	1
1.2	Propiedades más importantes del aluminio	1
1.3	Obtención del aluminio	3
1.4	Clasificación y usos más comunes del aluminio (designaciones para forjado y aleaciones de colada)	5
1.5	Planteamiento del problema.	8
1.6	Métodos de desgasificación	14
1.7	Modelado físico	19
1.8	Revisión bibliográfica	20
2	Capítulo II. Bases para la construcción del modelo físico	28
2.1	Objetivos	28
2.2	Criterios de similitud	28
2.2.1	Similitud cinemática	28
2.2.2	Similitud geométrica	29
2.2.3	Similitud dinámica	29
3	Capítulo III. Desarrollo experimental	32
3.1	Metodología experimental	32
3.2	Etapas de construcción	34
3.2.1	Fabricación de base estructural	34
3.2.2	Fabricación del soporte de la flecha y soporte del motor	35
3.2.3	Fabricación de la flecha rotatoria	38
3.2.4	Maquinado de rotores	41
4	Capítulo IV. Resultados y discusión	44
4.1	Escalamiento de las dimensiones del reactor	44
4.2	Escalamiento de la velocidad de rotación del rotor y del flujo de gas al modelo físico	45
4.3	Propiedades físicas de los materiales	49
4.4	Cálculo de la velocidad de agitación	49

4.5	Cálculo de la velocidad de ascenso del gas, diámetro de burbuja y flujo de gas	50
4.6	Equipo experimental	52
4.7	Pruebas preliminares	54
	4.7.1 Arreglo experimental	55
	4.7.2 Condiciones experimentales	57
	4.7.3 Resultados	58
	4.7.4 Discusión de resultados	64
5	Capitulo V. Conclusiones	68
	Trabajo futuro	69
	Índice de Figuras	70
	Índice de Tablas	72
	Referencias bibliográficas	73

Capítulo I.

Antecedentes

1.1 Importancia del aluminio

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, abarca alrededor del 8% (15% Al_2O_3), así que sus reservas son casi ilimitadas.

El aluminio es un material de considerable importancia en la actualidad, a la vez que su uso es múltiple. Sin duda es el material, después del acero, que se utiliza con mayor frecuencia, a pesar de que el periodo comprendido desde los comienzos de su obtención y utilización industrial apenas es de 120 años y su aplicación ha sido muy satisfactoria ya que ha ido remplazando a otros metales.

1.2 Propiedades más importantes del aluminio ^[1]

Actualmente, el aluminio posee una importancia económica enorme porque tiene una serie de propiedades que lo han posicionado como uno de los materiales más usados por la humanidad. A continuación se presentan las propiedades del aluminio y sus ventajas relativas a otros materiales:

- Densidad baja: 2.6 a 2.8 g/cm^3 (para aluminio puro 2.7 g/cm^3) lo cual representa un tercio de la densidad del acero.
- Buena resistencia mecánica: Existen materiales de aluminio normalizados para las aplicaciones más diversas con propiedades óptimas en cuanto a resistencia (resistencia a la tracción desde 60 hasta aproximadamente 530 N/mm^2).
- Buena resistencia a la corrosión: El aluminio puro y el de alto grado de pureza, así como las aleaciones libres de cobre muestran buena resistencia a la corrosión frente a muy diversos medios. Por esta razón, los materiales de aluminio exentos de cobre se emplean ampliamente en la construcción, en la industria química, en la

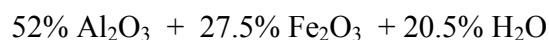
alimentaria, en artículos de consumo, en la construcción de vehículos, barcos y en otros sectores.

- Buen conformado mecánico: La excelente capacidad de ser conformado mecánicamente hace posible la fabricación de perfiles y tubos con secciones transversales complejas mediante extrusión. También, con casi todos los demás procesos convencionales de conformado en frío y en caliente se pueden fabricar, a partir de aleaciones de aluminio, toda clase de productos semiterminados y piezas terminadas.
- Las superficies admiten diversos tratamientos: A todos los materiales de aluminio se les puede aplicar la mayoría de los procesos superficiales convencionales (pulido, anodizado y pintado) encaminados a conseguir efectos decorativos, dureza superficial, resistencia al desgaste, etc.
- Elevada conductividad eléctrica: Todas las aleaciones de aluminio presentan una conductividad eléctrica relativamente alta. El intervalo máximo de conductividad eléctrica comprendido entre 38 y 34 $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$ corresponde al aluminio en sus grados puro y de alta pureza. Para conductores eléctricos se utiliza aluminio puro y aleaciones Al-Mg-Si.
- Elevada conductividad térmica: La conductividad térmica de las aleaciones normalizadas de aluminio comprenden valores entre 80 y 230 W/mK . Además, las superficies desnudas de aluminio se caracterizan por poseer un alto índice de reflexión de las radiaciones luminosas y térmicas. Esta buena conductividad del aluminio lo hace un material útil en piezas diversas como pistones, cilindros, intercambiadores de calor, donde se requiere de una alta rapidez de disipación del calor.

1.3 Obtención del aluminio ^[2]

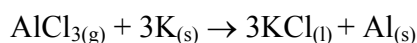
La metalurgia extractiva del metal ligero aluminio está gobernada por su comportamiento electroquímico especial. El aluminio manifiesta gran afinidad química por los no metales, como el oxígeno y el cloro, determinando su fuerte inclinación electronegativa en la serie de potenciales electroquímicos. Este es el principal motivo que en un principio impidió aplicar al aluminio los mismos procesos carbotérmicos para su reducción, a partir de sus óxidos, que ya se empleaban con metales ordinarios clásicos, como cobre, estaño, hierro plomo y cinc; principalmente por que se requerían muy altas temperaturas para su obtención (arriba de los 2000° C).

La primera bauxita fue descubierta en 1821 por el químico Berthier, del laboratorio de Química de la escuela de Minas de Paris; quien aplicó un análisis químico a una roca supuesta de mineral de hierro que provenía de los alrededores de la ciudad de Baux, y encontró la siguiente composición:



La primera comunicación formal que menciona la obtención de aluminio la presentó el danés Oersted en 1825 a la sociedad Danesa de Ciencias, en la que se describe la obtención del aluminio por reducción de su cloruro con amalgama de potasio. Este dato fue puesto en duda durante mucho tiempo, hasta que posteriores investigaciones confirmaron que el aluminio se podía obtener por el método propuesto por Oersted.

Wohler en 1827, mejora el proceso de reducción química del aluminio, empleando potasio metálico en vez de su amalgama y usando como precursor al cloruro de aluminio en estado de vapor. La reacción es:



Para la obtención comercial del aluminio; Sainte-Claire Devile desarrolla en 1854 otro proceso, resultante de una consideración racional y económica de las materias primas.

Deville sustituye al cloruro de aluminio por el cloruro doble de aluminio y sodio que es mucho menos higroscópico que el primero, y emplea sodio que es mucho más económico que el potasio.

Actualmente, la extracción del aluminio de la bauxita se efectúa en tres etapas: minería, refinación y reducción. Hay muchos métodos para obtener la alumina pero el Bayer es el que más se usa en la industria del aluminio.

El proceso Bayer para la obtención de óxido de aluminio a partir de bauxita es un proceso hidrometalúrgico de separación y extracción, muy eficaz y selectivo. La bauxita después de la tostación en un horno giratorio, se pulveriza en un molino de bolas. El polvo se carga en autoclaves, donde a 165°C y presión de vapor de 6 atmósferas es transformado en aluminato de sodio por la acción de la sosa cáustica de 45°B quedando las impurezas en el residuo insoluble. En filtros prensa se separa el residuo insoluble que son los lodos rojos, se les llama lodos rojos debido a su alto contenido de óxido de hierro aunque también contiene cantidades pequeñas de óxidos de aluminio, calcio, magnesio, sodio y titanio mientras la lejía (NaOH) de aluminato se conduce a los reactores de descomposición en donde diluida hasta aumentar varias veces su volumen precipita el hidróxido de aluminio que se separa del agua madre en filtros. La solución madre se vuelve a utilizar, la cual se concentra hasta 45°B en evaporadores y se vuelve a emplear en la disgregación en autoclaves. El hidróxido de aluminio se calcina a unos 1400°C en hornos giratorios.

La alumina así purificada se prepara para el siguiente paso: la electrolisis, que se realiza por medio del proceso ideado y desarrollado por Hall y Heroult. Este proceso consiste de celdas electroquímicas que contienen criolita fundida (Na_3AlF_6) a 980°C para disolver la alúmina, la cual al someterse a la electrolisis se divide en aluminio y oxígeno. El aluminio baja al fondo de la celda donde se extrae periódicamente y el oxígeno se combina con el carbono del ánodo para producir CO_2 . Para una tonelada de aluminio se necesitan 2 toneladas de alúmina, que a su vez requiere de 4 toneladas de Bauxita. En general para producir un kilogramo de aluminio se requieren 22KWh de energía. La pureza típica del aluminio alcanzada con este proceso oscila entre 99 y 99.8% de pureza, que es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, aunque para aplicaciones especiales de extrusión o ductilidad alta se requiere aluminio con una pureza del 99.99%.

1.4 Clasificación y usos más comunes del aluminio (designaciones para forjado y aleaciones de colada)

Los principales elementos de aleación del aluminio son cobre, cinc, magnesio, silicio, manganeso y litio. También se pueden encontrar en las aleaciones de aluminio trazas de cromo, titanio, circonio, bismuto y níquel. Además, el hierro está invariablemente presente en cantidades pequeñas. Hay más de 300 aleaciones forjadas con 50 de uso común. Estas normalmente son identificadas por códigos de cuatro dígitos que se originaron en EE.UU. y que ahora se aceptan universalmente. En la tabla 1 se describe el sistema de códigos que se asignan a las aleaciones de colada así como a las forjadas, mientras que en la tabla 2 se presentan las características de algunas aleaciones de aluminio y sus usos comunes.

Tabla 1. Designación para aleaciones trabajadas en frío y de colada.

Mayor elemento aleante	Forjado	Colada
Ninguno (99% Aluminio)	1XXX	1XXX0
Cobre	2XXX	2XXX0
Manganeso	3XXX	
Silicio	4XXX	4XXX0
Magnesio	5XXX	5XXX0
Magnesio Silicio	6XXX	6XXX0
Zinc	7XXX	7XXX0
Litio	8XXX	
Sin uso		9XXX0

Tabla 2. Características de algunas aleaciones de aluminio y sus usos comunes.

Aleación	Características	Uso común
1050/1200	Buena conformación, soldabilidad y resistente a la corrosión.	Alimentos e industria química.
2014A	Tratable térmicamente. Alta resistencia. Mala soldabilidad. Baja resistencia a la corrosión.	Ventiladores.
3103/3003	No tratable térmicamente. Trabajada y endurecida con elementos de aleación. Buena soldabilidad, buena conformación y resistente a la corrosión.	Chasis de vehículos, atmósferas marinas
5251/5052	No tratable térmicamente. Trabajada y endurecida con elementos de aleación. Buena soldabilidad, buena conformación y resistente a la corrosión.	Chasis de vehículos, atmósferas marinas
5454	No tratable térmicamente. Se usa en temperaturas de 65-200°C. Buena soldabilidad y resistente a la corrosión	Ollas y tanques a presión, transporte de amonio, nitrato y petróleo. Plantas químicas
5083/5182	No tratable térmicamente. Buena soldabilidad y resistente a la corrosión. Muy resistente en el agua de mar y atmósferas industriales puede usar como súper aleación a temperaturas criogénicas pero necesita un	Envases a presión a temperaturas inferiores a 65°C. Para construcción de edificios en general.

tratamiento de recocido.		
Tratable térmicamente.		
6063	<p>Mediana resistencia.</p> <p>Buena soldabilidad y resistente a la corrosión.</p>	<p>Uso arquitectónico ventanas, perfiles. Tubos de cañería</p>
Usada para perfiles.		
6061/6082	<p>Tratable térmicamente</p> <p>Mediana resistencia.</p> <p>Buena soldabilidad y resistente a la corrosión</p>	<p>Estructuras sometidas a esfuerzos, puentes, grúas, barriles de cerveza.</p>
6005	<p>Tratada térmicamente.</p> <p>Propiedades muy similares al 6082.</p> <p>Preferiblemente endurecida en aire para evitar problemas de distorsión</p>	<p>Paredes.</p>
7020	<p>Tratable térmicamente.</p> <p>Endurece naturalmente con el tiempo después de haber soldado.</p> <p>Susceptible a esfuerzos por corrosión.</p>	<p>Vehículos acorazados, marcos de bicicleta y motocicleta.</p>
7075	<p>Tratada térmicamente.</p> <p>Muy resistente.</p> <p>Mala soldabilidad.</p> <p>Poca resistencia a la corrosión.</p>	<p>Ventiladores.</p>

1.5 Planteamiento del problema.

El aumento espectacular en el consumo de aluminio es prueba de lo que este metal significa en la industria moderna. El aluminio es el más importante de los metales no ferrosos el cual sigue después del hierro en mayor consumo nacional y mundial. El aluminio está dispuesto en una diversidad de formas que van desde planchas gruesas (250mm) hasta hojas delgadas en extremo (.005mm); el cual puede ser usado en diversas aplicaciones en diferentes áreas en las cuales las más importantes y exigentes son automotriz, aeronáutica, militar y navegación espacial (ver figura 1).



Figura1. Piezas automotrices de aluminio de alta calidad.

Debido a los altos requerimientos de calidad de las aleaciones de aluminio para estas industrias, se ha desarrollado proyectos de investigación encaminados a la reducción de defectos y rechazos en la fabricación de piezas de aluminio y sus aleaciones y principalmente a la refinación del metal líquido y conformación de piezas manufacturadas de alta calidad y libre de defectos.

La refinación del metal líquido se refiere principalmente a quitar impurezas como son elementos y compuestos indeseables los cuales generan inclusiones así como también los gases atrapados incluyendo principalmente al hidrógeno el cual genera sopladuras y poros

en la piezas de colada que a su vez debilitan y degradan las propiedades mecánicas y la calidad de las piezas.

Existen varias técnicas para la fusión del aluminio secundario y esto depende del tipo de horno utilizado, siendo tres los más comúnmente utilizados: reverbero, inducción y crisol. En este trabajo se realizó el estudio sobre un horno de fusión tipo crisol, que consta de un quemador lateral de gas butano con un ventilador de aire para incrementar la combustión del gas dando como resultado un aumento en la temperatura. Este horno se carga de diferentes materias primas como son retornos de fundición, chatarra y lingotes de fundición. Una vez obtenido el aluminio líquido, se lleva a cabo la descorificación mediante fundentes de limpieza, los cuales son sales que no deben contener Na ó Ca. Los fundentes de limpieza tienen como objetivo principal separar los óxidos del metal líquido y evitar sobreoxidación. Después del descorificado sigue el **proceso de desgasificado** que se lleva a cabo con la unidad desgasificadora instalada en un montacargas para su fácil traslado hacia el crisol. Así, el crisol de fusión también funciona como holding u horno de retención del metal líquido. La unidad desgasificadora está diseñada con la técnica del rotor inyector. Después del desgasificado siguen las etapas de refinación de grano y modificación (para aleaciones de alto contenido de silicio). La refinación de grano se lleva a cabo mediante la adición de una aleación maestra de Ti-B, y el tratamiento de modificación se lleva a cabo mediante la adición de Sr. Entre cada etapa o paso en la técnica de fusión el horno se recubre de una tela de lana de fibra de vidrio la cual es inflamable y su función principal es evitar el contacto con el aire de la atmósfera para evitar la reoxidación de la superficie del metal así como también evitar la reabsorción de hidrógeno. Por último, se realiza el vaciado del metal líquido en moldes los cuales pueden ser: die casting (permanentes), arena, lost foam (cera perdida). En muchos casos para asegurarse de que en los moldes no se arrastren inclusiones se colocan trampas o filtros para evitar el paso de estas. Estos filtros ó coladeras son cerámicos porcelanizados. Todas estas operaciones son de gran importancia para obtener piezas de alta calidad, ya que si no se realizan adecuadamente se generan defectos que influyen directamente en las propiedades mecánicas de la pieza.

En la figura 2 se puede apreciar claramente como el hidrogeno afecta las propiedades mecánicas del aluminio.

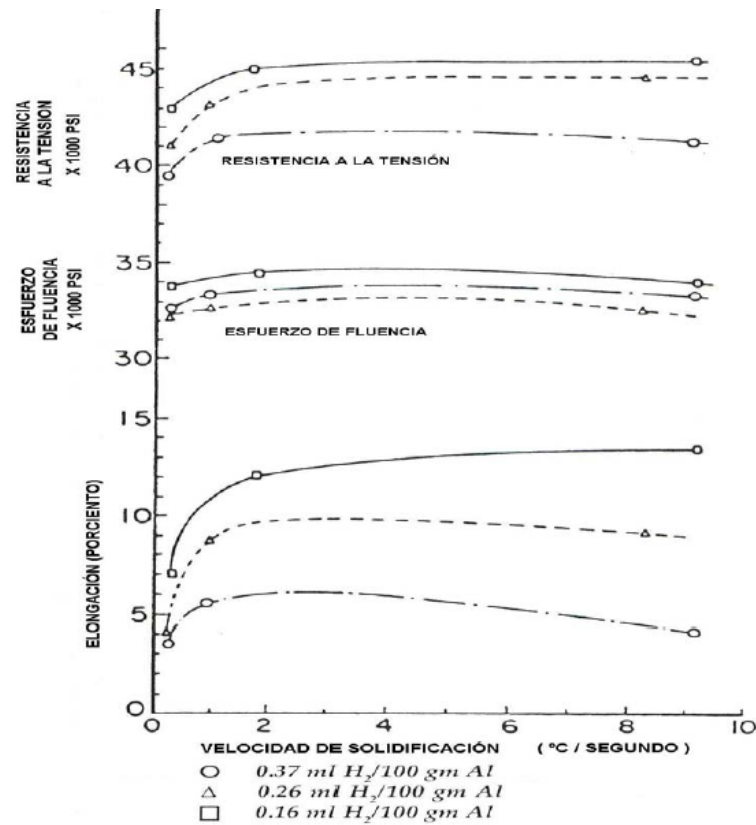
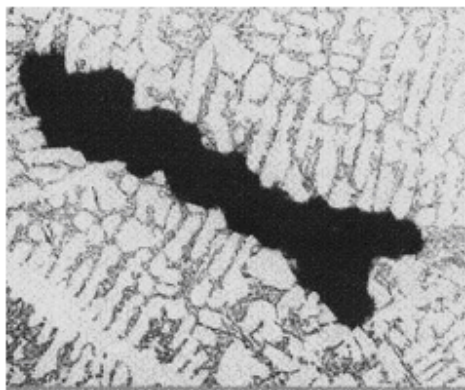


Figura 2. Efecto del Hidrogeno sobre las propiedades mecánicas del aluminio

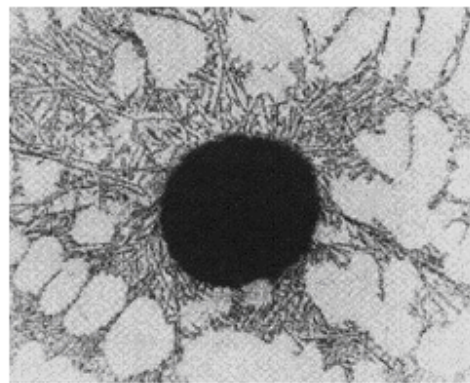
Los elementos indeseables en el aluminio son litio, sodio y calcio (alcalinos) de los cuales el sodio proviene de su obtención en proceso electrolítico de las celdas Hall-Heroult y los demás provienen desde el mineral de aluminio (Bauxita) debido a su facilidad de formar compuestos. Las inclusiones se generan debido a la exposición de la superficie del metal al ambiente, lo que genera óxidos o también puede ser debido a la mala calidad de los refractarios del horno, o por una mala selección o mal uso de los fundentes (fluxes) que contienen cloro.

La porosidad por contracción y gas puede ocurrir separadamente o junta, produciendo indeseables defectos en las piezas coladas. Uno de los mayores problemas asociados con las aleaciones de Aluminio obtenidas mediante el proceso de fundición es la formación de cavidades a escala micrométrica, llamadas microporosidad. La microporosidad causa la reducción de las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia a la fatiga, a la

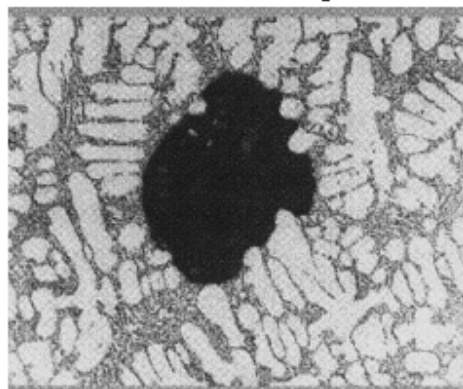
tensión y una degradación de la superficie en las piezas vaciadas. La formación de microporosidad se atribuye generalmente a dos factores, contracción acompañada con una falta de alimentación interdendrítica durante la solidificación de la zona pastosa (poros por contracción); y evolución de burbujas de gas de Hidrógeno, debido a la una repentina disminución en la solubilidad del Hidrógeno durante la solidificación. En la figura 3 se muestran los diferentes tipos de poros debidos a una mala alimentación del metal o a retención de hidrogeno o a una combinación de ambas.



a) Porosidad debida a contracción durante la solidificación



b) Porosidad debido a retención de gas



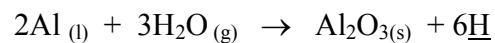
c) Porosidad debida a contracción más retención de gas

Figura 3. Diferentes tipos de porosidades presentes en aluminio ^[3]

El Hidrógeno es el único gas que tiene una solubilidad apreciable en el Aluminio y sus aleaciones, y su solubilidad varía directamente con la temperatura. En el Aluminio puro, el hidrógeno tiene un incremento de solubilidad en el punto de fusión de aproximadamente 0.02 ml/100 g de Al en la fase sólida a 0.7 ml/100 g de Al en la fase líquida. En el estado líquido, también se observa una fuerte dependencia de la solubilidad con la temperatura. En

la solidificación, casi todo el Hidrógeno disuelto en el líquido es rechazado por el sólido que va formándose. Con más frecuencia este Hidrógeno rechazado forma una fase gaseosa que resulta en porosidad dentro de productos solidificados. Poco Hidrógeno es absorbido de la atmósfera, la mayor cantidad se obtiene de la disociación del vapor de agua en la superficie del metal líquido, o de la humedad de los aditivos de fusión como crisoles o herramientas. Los gases de combustión de hornos que queman gas también pueden ser una fuente importante de Hidrógeno.

El Hidrógeno liberado por la reacción de la humedad con el aluminio está en forma atómica de acuerdo a la siguiente reacción:



Este Hidrógeno atómico es muy reactivo y rápidamente es absorbido por el Aluminio fundido en donde queda disuelto.

La absorción del Hidrógeno se puede minimizar mediante técnicas de fusión apropiadas, y el Hidrógeno disuelto se puede remover del aluminio líquido por medio del uso de técnicas de desgasificación. Existen muchos procesos para desgasificar el aluminio líquido y sus aleaciones, pero todos caen dentro de los siguientes tres tipos generales: i) desgasificado natural, ii) purgado con gas iii) desgasificado por vacío. Solamente el purificado con gas es ampliamente utilizado en la industria de la fundición de aluminio y sus aleaciones.

También los tratamientos en estado líquido de algunas aleaciones de aluminio tienen un gran efecto en la presencia de poros. Bajo condiciones de fundición común, se ha usado la modificación con Sr o Na en las aleaciones coladas base Al-Si para modificar la morfología del Si eutéctico de laminar a fibroso. Se ha reportado que la modificación morfológica del eutéctico incrementa la porosidad, donde grandes áreas de macroporosidad son reemplazadas por porosidad más fina y ampliamente distribuida.

Cuando se utiliza Na como elemento modificador, se deben tener en cuenta las características particulares siguientes: El Na metálico tiene una dificultad en el manejo, elevada reactividad, generación elevada de gases contaminantes. Las sales son higroscópicas por lo que pueden introducir humedad e hidrógeno al baño metálico.

La solubilidad del hidrógeno en aluminio puro a una atmósfera de presión se da por la siguiente ecuación:

$$\log_{10} S = -2550/T + 2.62$$

En la ecuación anterior la solubilidad S está en mililitros de hidrógeno a temperatura y presión estándar por cada 100 gramos de aluminio y la temperatura T está en grados Kelvin.

La temperatura juega un papel muy importante dentro de la solubilidad, ya que por cada 110°C de sobrecalentamiento la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido incrementa al doble, tal y como se aprecia en la figura 4.

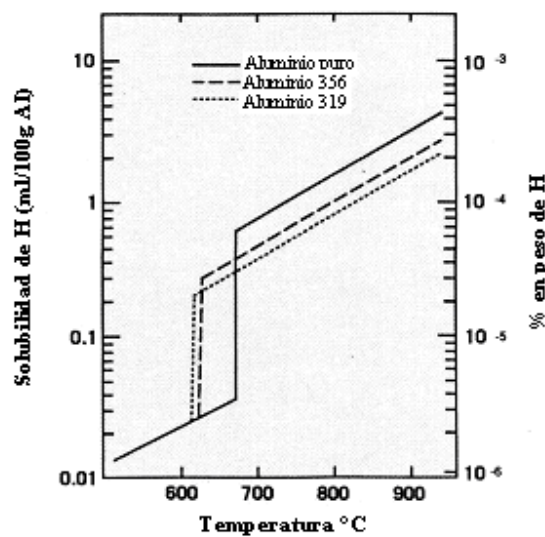


Figura 4. Solubilidad del hidrógeno en función de la temperatura para aluminio puro y algunas aleaciones de aluminio ^[3].

Las técnicas de desgasificado de aluminio se clasifican en las siguientes categorías: a) desgasificado natural, b) desgasificado por vacío, y c) desgasificado por purga de gases.

En este trabajo se tratará solamente lo referente a la remoción de hidrógeno del aluminio líquido con el método de purga de gases mediante la técnica del rotor inyector a través de

la construcción un modelo físico que eventualmente nos permita comprender más claramente la fenomenología que ocurre dentro de estos crisoles, ya que la cinética de desgasificación no se pueden medir físicamente en el sistema de aluminio debido a la opacidad visual del sistema así como también a las altas temperaturas que se manejan y a la imposibilidad práctica de medir continua e instantáneamente el contenido de hidrógeno disuelto en el aluminio líquido. En cambio, con el modelo físico podemos manipular variables como son: velocidad de giro del rotor en RPM, flujo de gas, posición del rotor, y analizar la cinética de desgasificación sin tener alguna consecuencia económica y evitando al mismo tiempo riesgo hacia los experimentadores. Además este modelo va servir para futuras investigaciones con respecto a la fluídínámica del aluminio líquido en estos sistemas bifásicos (líquido – gas) así como también procesos de transporte de materia por lo cual se justifica la construcción y realización de este trabajo.

1.6 Métodos de desgasificación.

Todos los métodos existentes para la desgasificación caen dentro de tres categorías las cuales son:

- a) Desgasificación natural
- b) Desgasificación al vacío
- c) Desgasificación con purga de gases

a) Desgasificación Natural

La desgasificación natural se presenta cuando el hidrógeno se libera a la atmósfera y esto sucede cuando el hidrogeno sobresaturado en el aluminio se libera a la atmósfera bajando las temperaturas de operación para disminuir su solubilidad. Esta técnica no es muy conveniente porque suele ser lenta y no evita altos contenidos de hidrógeno en aluminio, aunque operar a bajas temperaturas si es recomendable.

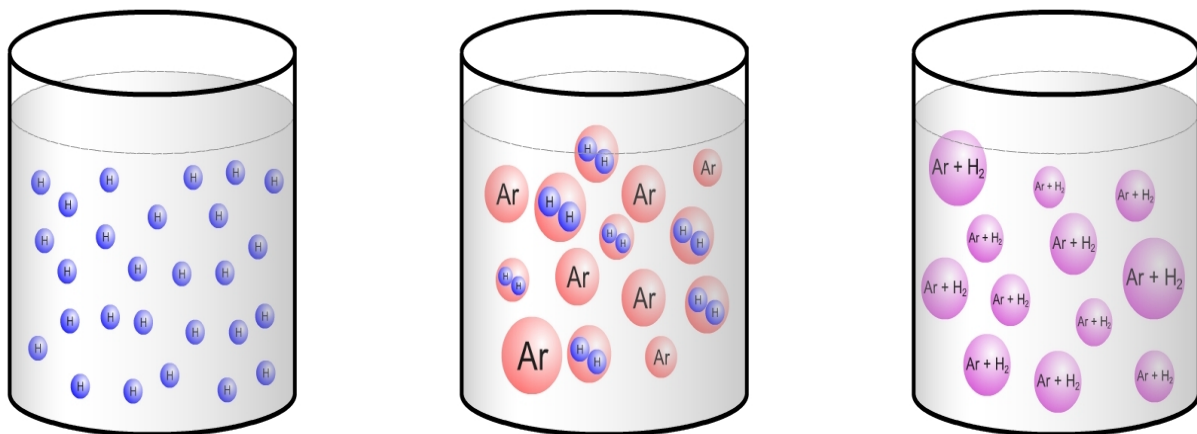
b) Desgasificación al vacío

La desgasificación al vacío es usada ampliamente en Europa. La eliminación de la presión atmosférica sobre el metal fundido estimula la formación de burbujas de hidrógeno las cuales son removidas a través de un sistema de bombeo. Para disminuir el tiempo de este proceso se introduce una lanza en el fondo del horno ya que esto promueve la agitación y

ayuda a las burbujas de hidrógeno a subir a la superficie libre. Con este método se llega a obtener niveles de hidrógeno de 0.08ml H₂/100g Al.

c) Desgasificación con purga de gases

Este tratamiento se lleva a cabo mediante el uso de gases inertes y reactivos o mezcla de ambos. El principio del tratamiento de desgasificado con purga de gas se muestra en la figura 5.



a) Hidrógeno monoatómico disuelto dentro del aluminio fundido

b) Inyección del gas inerte dentro del aluminio fundido.

c) Expulsión del Hidrógeno molecular H₂.

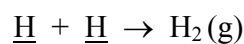
Figura 5. Resumen de las etapas en la remoción de hidrógeno.

Las etapas involucradas en la cinética de remoción del hidrógeno son:

- a) Transporte de Hidrógeno a través del aluminio fundido hacia la interfase aluminio fundido-burbujas de gas inerte (el mecanismo de transporte predominante es convectivo en presencia de un rotor o una propela rotatoria que agite al baño).
- b) Transporte difusivo a través de la capa limite metal-gas.
- c) Adsorción de los átomos de hidrógeno en la superficie de la burbuja.

- d) Reacción entre dos átomos de Hidrogeno para la formación de Hidrógeno molecular H_2 dentro de la burbuja de Ar.
- e) Transporte difusivo del Hidrógeno molecular hacia el seno de la burbuja.
- f) Expulsión del H_2 hacia la atmósfera.

El hidrógeno existe en el aluminio en forma atómica ya que este no forma hidrógeno molecular H_2 . Para que se lleve a cabo la remoción de hidrógeno se requiere que los átomos de hidrógeno se combinen para formar moléculas. Sin embargo la formación de burbujas de gas en el líquido no es materia fácil, ya que implica la nucleación homogénea que es termodinámicamente difícil o energéticamente desfavorable. Entonces, se tienen que introducir burbujas libres de hidrógeno, para que los átomos de hidrógeno puedan difundir desde el seno del metal líquido hacia las burbujas y entonces formar las moléculas de H_2 de acuerdo siguiente reacción en la intercara burbuja-líquido:



Y entonces el hidrogeno puede ser arrastrado a la superficie del baño.

Las diferencias entre varias técnicas de desgasificación se deben al tipo de gas o como son introducidas las burbujas al baño. La eficiencia del desgasificado es fuertemente dependiente del tamaño de burbuja.

Algunos gases o mezclas de gases pueden ser empleados, los cuales deben estar completamente libres de vapor de agua, los mas comunes son nitrógeno o argón seco.

El cloro puro fue usado extensivamente en el pasado, pero con el paso del tiempo se ha ido eliminando su uso debido a la toxicidad y efectos corrosivos en equipos y ductos de ventilación. Mezclas de nitrógeno y freon-12(CCl_2F_2) tienen uso común así como también hexafluoruro de azufre SF_6 .

El tratamiento de desgasificación del aluminio se puede hacer de diferentes formas y estas dependen de cómo se inyecte el gas, el mas simple pero menos efectivo es la inyección de gas a través de una lanza de grafito, ya que esta produce burbujas grandes de 2 a 3cm de diámetro las cuales tienen poca superficie de reacción y poco tiempo de residencia dentro del líquido ya que ascienden rápidamente a la superficie.

La desgasificación con tabletas o Fluxes también se utiliza. Este proceso trata de introducir las tabletas dentro del líquido a través de una campana perforada. El más común de estos desgasificadores sólidos es el hexacloretano (C_2Cl_6), el cual se descompone a una temperatura cercana a $700^\circ C$. El inconveniente de este método es que los fluxes promueven espuma la cual genera humos indeseables. Además estas tabletas son higroscópicas y muchas veces en lugar de remover hidrogeno lo puede introducir.

El tratamiento de desgasificación del aluminio líquido con el método del **Rotor Inyector** el cual es el tema de este trabajo, es el mejor método de desgasificación del aluminio ya que su eficiencia es muy alta comparada con los métodos anteriores. Los rotores son de grafito que usualmente son de 15cm diámetro los cuales van enroscados en una lanza hueca del mismo material, que es el medio por donde viaja el flujo de gas Argón ó Nitrógeno o mezcla de ambos y cuando llega al rotor las burbujas se rompen rápidamente dando como resultado burbujas mucho más finas que con la lanza sola o con los Fluxes. Estas burbujas son de 3 a 6mm de diámetro y se dispersan a través de todo el cuerpo del líquido. Con este método se pueden alcanzar niveles de hidrogeno de $0.05 \text{ ml H} / 100 \text{ g Al}$.

En la tabla 3 se resumen los diferentes niveles aceptables de hidrogeno disuelto en aluminio para diversos usos.

Tabla 3. Niveles aceptables de hidrógeno disuelto en piezas de aluminio.

Uso de la aleación	Concentración máxima permitida de hidrógeno disuelto
Perfiles extruidos.	0.1 a 0.15 ml H_2 /100g de Al
Piezas automotrices.	$\leq 0.1 \text{ ml } H_2/100 \text{ g de Al}$
Latas de bebidas.	
Papel aluminio.	

El nivel de hidrógeno contenido en el aluminio puede ser medido experimentalmente a nivel laboratorio y nivel industrial cuantitativamente con una muy buena precisión, ya que en el mercado existen equipos para la medición de este. A nivel industrial se utilizan los equipos Telegas[®] y Alocan[®] y a nivel laboratorio se puede utilizar el método de presión reducida y análisis metalográfico. Con estas técnicas se puede llegar a tener un control muy minucioso del H_2 en el baño metálico.

En las fotografías de la figura 6 se puede apreciar claramente el nivel de eficiencia de los diferentes métodos utilizados para la remoción del hidrogeno disuelto en el aluminio, y como consecuencia de estos mismos el grado de porosidad resultante.

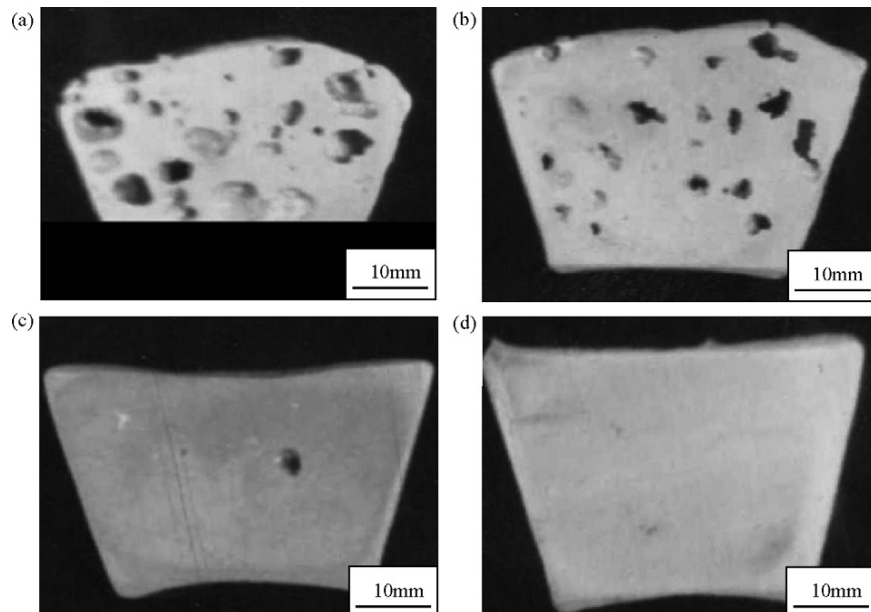


Figura 6. Niveles de refinación del aluminio mediante diferentes métodos.
a) Sin tratamiento, b) Lanza, c) Rotor Inyector, d) Refinación al vacío.

En la figura 7 se muestran los componentes del sistema de rotor inyector y en la figura 8 se presentan fotografías de un modelo físico de agua que comparan el tamaño y distribución de burbujas entre el sistema de rotor inyector y lanza, con las cuales se puede apreciar que con el rotor se presentan tamaños pequeños de burbujas bien distribuidas en todo el líquido, lo que sin duda representa una ventaja para la cinética de desgasificación con respecto al uso de la lanza.

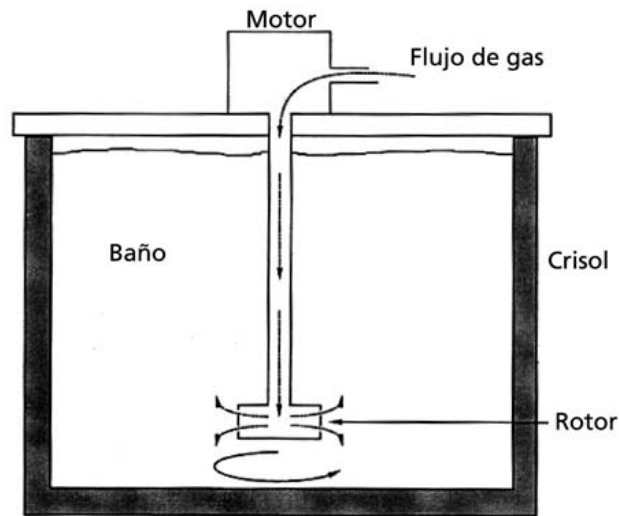


Figura 7. Componentes del sistema Rotor-Inyector ^[3].

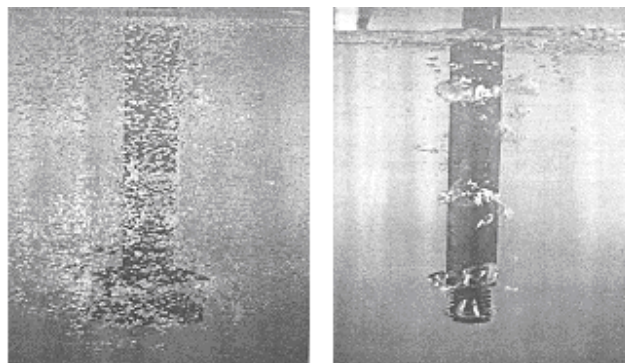


Figura 8. Comparación entre el tamaño y distribución de burbujas en el sistema rotor inyector y lanza con modelos físicos de agua ^[3].

1.7 Modelado físico ^[4].

Un modelo físico es la representación o aproximación de un proceso o sistema real utilizando otros materiales cumpliendo con estrictos criterios de similitud. Por ejemplo, en este trabajo, en vez de usar un horno con paredes de refractario se utiliza un tanque de Plexiglás y en vez de usar aluminio se utiliza agua. En el caso de procesos analizados desde el punto de vista de la fluidinámica, estos criterios de similitud son geométrica, dinámica y cinemática.

Los modelos físicos son una herramienta muy importante para el Ingeniero de Procesos ya que con estos se puede obtener el entendimiento necesario de lo que pasa dentro de un

reactor y así poder estudiar los fenómenos de flujo de fluidos así como también fenómenos de transporte de materia y así poder controlar, diseñar, predecir, optimizar y analizar el proceso.

Los modelos físicos se pueden usar conjuntamente con modelos matemáticos, ya que con las mediciones experimentales que se obtengan con los modelos físicos se pueden validar los resultados de los modelos matemáticos.

En este trabajo se describirá muy brevemente lo que es un modelo matemático ya que no es el objetivo de este trabajo. Un modelo matemático es una ecuación o sistemas de ecuaciones algebraicas o diferenciales que representan fenómenos físicos o químicos de procesos o sistemas reales. Hay modelos que describen fenómenos basados en primeros principios que se llaman fundamentales o mecanísticos y los hay estadísticos o empíricos, que se llaman de “caja negra”. Los modelos matemáticos se construyen en una serie de etapas que constituye su metodología. Estas etapas son: a) Identificación del problema, b) Formulación matemática, c) Solución (analítica o numérica), d) Validación del modelo, e) Síntesis de resultados, f) Implementación del modelo.

1.8 Revisión Bibliográfica.

En esta sección se analizaron y se estudiaron los trabajos más relevantes con respecto a la temática de la desgasificación del aluminio estudiada a través de modelado físico.

Yoshikazu Ohno y col ^[5] analizan el sistema comercial de rotor inyector GBF, solamente que este sistema está adaptado a un reactor que tiene unas paletas pegadas en las paredes del horno las cuales fueron diseñadas para evitar que se forme el vórtice en la superficie del metal y también las burbujas tengan mayor tiempo de residencia en el metal. El sistema GBF utiliza altas velocidades angulares del rotor de alrededor de 600 a 950 RPM. Estas velocidades altas se deben a que los flujos de gas son la mitad ó un tercio a los que se usan en un sistema convencional. Entonces, con estas altas velocidades de rotación se promueve la formación de burbujas finas de gas (nitrógeno o argon), las cuales tienen mayor tiempo de residencia y presentan gran superficie de contacto burbuja-líquido. El objetivo de este trabajo se enfoca principalmente a obtener el tamaño de burbuja menor, comparándolo con el tamaño obtenido por otros procesos como el de SNIF (Spinning Nozzle Inert Flotation),

en el cual se producen burbujas de 1-10mm de diámetro las cuales son demasiado grandes, comparadas con las que produce el sistema de Yoshikazu Ohno y col. ^[5]. Este trabajo cuenta con resultados industriales de los tiempos de desgasificación obtenidos para diferentes aleaciones y compara los defectos que principalmente son las inclusiones y la porosidad con respecto al método de fluxes con cloro.

Las inclusiones y porosidad se clasifican en tres categorías:

- Pequeñas (S): .1 - .3mm
- Medianas (M): .3 - 1mm
- Grandes (L): mayores a 1mm

Los resultados obtenidos con el sistema de desgasificación GBF indican que se pueden alcanzar inclusiones y poros de 7 a 100 μm las cuales caen dentro del rango de pequeñas, las cuales no son tan nocivas para las propiedades mecánicas del aluminio.

Las ventajas de este proceso son:

- Muy bajo consumo de gas (Ar)
- Alta durabilidad del refractario del horno (2 a 3 años).

F.Boeuf, M.Rey y col. ^[6] desarrollaron una investigación con el objetivo estudiar la eficiencia de desgasificación tomando como principales variables de proceso las mezclas de gases así como también la velocidad de rotación del rotor y no toman en cuenta el tamaño de burbuja como Yoshikazu Ohno y col ^[5].

F.Boeuf, M.Rey y col. ^[6] hicieron pruebas con argón puro y mezclas de argón y cloro, variando la concentración del cloro del 5 hasta el 20%. Los resultados muestran que el aumento en la concentración del cloro aumenta la eficiencia en la remoción de hidrógeno, sodio e inclusiones. Todas estas pruebas se hicieron en rectores industriales.

También se hicieron comparaciones entre una olla de 2 m³ y una olla de 7m³ de capacidad y se comprobó que en el proceso de desgasificación domina más el área superficial de la burbuja que el volumen la olla, ya que en la olla de 2m³ se obtuvieron menores eficiencias de desgasificado debido a que como es más pequeña, se inyecta menos gas y el área de las burbujas es menor.

De acuerdo con los investigadores, estos experimentos se hicieron en modelos de tamaño real para aproximarse más a la realidad y así poder escalar los resultados del modelo físico

al reactor industrial. F.Boeuf, M.Rey y col. ^[6] analizan que el área superficial es función de varios factores como son: el diámetro de la olla, la gravedad, la viscosidad del gas, densidad del líquido, densidad del gas, viscosidad del gas y tensión interfacial.

Debido a que con los reactores reales no se puede entender bien el problema de la distribución de burbujas, así como también el problema del área superficial, F.Boeuf, M.Rey y col. ^[6] decidieron hacer dos modelos físicos de tamaño real cumpliendo con 3 parámetros de similitud, a través de igualar algunos números adimensionales para satisfacer la similitud dinámica entre el sistema industrial y el modelo incluyendo fuerzas inerciales, boyantes y de tensión superficial. Los números considerados fueron:

1. Número de Weber
$$We = \frac{\rho u^2 l}{\sigma}$$

Interpretación fenomenologica

$$We = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{tensión superficial}}$$

Aplicación

Formación de burbujas,
atomización de un chorro
líquido

- ρ es la densidad del fluido [kg/m³]
- v es la velocidad característica del fluido [m/s]
- l es una longitud característica [m]
- σ es la tensión superficial [N/m]

2. Número de Froude
$$Fr^2 = \frac{v^2}{gl}$$

Interpretación fenomenologica

$$Fr = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza de gravedad}}$$

Aplicación

Comportamiento de ondas
y superficies en corrientes
de vaciado

- l longitud característica [m]
- v parámetro de velocidad característica [m/s]
- g aceleración de la gravedad [m/s²]

3. Número de Reynolds
$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Interpretación fenomenológica

$$Re = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza viscosa}}$$

Aplicación

Flujo de fluidos

- ρ densidad del fluido [kg/m³]
- v_s velocidad característica del fluido [m/s]
- D diámetro característico del horno [m]
- μ viscosidad dinámica del fluido [Kg/ms]

V.S.Warke, S. Shankar, M.M.Makhlouf ^[7] desarrollaron un modelo matemático de la desgasificación del aluminio el cual se divide en dos partes. La primera es la remoción de hidrógeno haciendo un balance global de masa suponiendo que el hidrógeno disuelto siempre está perfectamente mezclado en el aluminio, es decir, no hay gradientes de concentración del hidrogeno dentro de la olla. El balance de masa es el siguiente:

$$[K_s A_s (C_{eq} - C)] - [K_b A_b (C - C_b)] = V A l \times \frac{dc}{dt}$$

Donde:

K_s es el coeficiente de transferencia de masa en la interfase aluminio fundido/aire

A_s es la superficie libre del aluminio fundido

C_{eq} es la concentración inicial de Hidrogeno

C es la concentración final de Hidrogeno

K_b es el coeficiente de transferencia de masa en la interfase aluminio fundido/burbuja

A_b es el área total de las burbujas

C_b es la concentración de Hidrogeno dentro de la burbuja

V_{Al} es el volumen total del aluminio

dc/dt es la rapidez de cambio del hidrogeno dentro del aluminio fundido

Entonces el primer término de la ecuación representa el Flux de hidrógeno que entra en el aluminio fundido desde la atmósfera, el segundo término representa el Flux de hidrógeno que sale hacia la atmósfera a través de las burbujas y el término de lado derecho representa el decaimiento de la concentración de hidrogeno dentro del fundido. También se considera que la concentración de hidrógeno dentro de la burbuja (C_b) es cero, debido a que la burbuja que se inyecta no contiene hidrogeno.

Entonces, la ecuación se reduce a:

$$[K_s A_s (C_{eq} - C)] - [K_b A_b C] = V_{Al} \times \frac{dC}{dt}$$

Dentro del balance de materia vienen dos coeficientes de transporte de materia los cuales son K_s y K_b , siendo K_s el coeficiente de transporte de materia entre la interfase del aluminio fundido y el aire, mientras que K_b es el coeficiente de materia entre el aluminio fundido y la burbuja. Estos coeficientes fueron calculados usando una aproximación semiempírica.

La segunda parte es acerca de la de remoción de partículas sólidas, siendo este modelo un poco más complicado y en este caso se utilizó un modelo matemático para la población de partículas. Este balance poblacional se pudo resolver analíticamente solamente en casos especiales.

Mariola Saturnus and Jan Botor ^[8] desarrollaron un modelo físico y matemático, con los cuales nos explican las diferencias en impurezas presentes en el aluminio cuando se varían las materias primas utilizadas. Se analizaron dos materias primas cargadas: la primera es usar aluminio primario proveniente del proceso Bayer y la segunda es usar chatarra de aluminio reciclada. En esta investigación se recabaron datos industriales de algunos

reactores industriales alrededor del mundo indicando también la industrias que los utilizan, los cuales van a ser de gran utilidad comparativa para nuestra investigación.

Mariola Saternus and Jan Botor ^[8] utilizaron la unidad desgasificadora patentada como URO-200, la cual utiliza como gases desgasificadores al argón y al cloro. Con un modelo físico se analizaron la cinética de formación de las burbujas, la cual consta de tres etapas en las cuales la burbuja va evolucionando. La primera es el movimiento libre del gas en el cual las burbujas tienen forma esférica y espacio suficiente entre ellas, la segunda es la creación de cadenas de burbujas con menor espacio entre ellas lo cual va a dar origen a una nueva burbuja mucho más grande y de forma elipsoidal, y la última etapa se da cuando esta burbuja de forma elipsoidal empuja a la burbuja predecesora a ella la cual se va a romper en pequeñas burbujas de distintos diámetros.

En el modelo físico realizaron pruebas de desoxidación, simulando la remoción de hidrógeno en el aluminio, en las cuales analizaron varias velocidades de rotación así como también diferentes flujos de gas. Las velocidades de rotación fueron de 0 a 900RPM y los flujos de gas fueron de 2.5 a 17.5 l/min. En el análisis introdujeron el concepto de diámetro equivalente de burbuja (d_e) el cual es indispensable para calcular la concentración final de hidrógeno en el modelo matemático. En reactores de desgasificación por el método del rotor inyector el valor de d_e va de 0.005m a 0.015m. Durante la experimentación se encontró que la velocidad y flujo de gas óptimos son de 150 – 250RPM y 10 – 15dm³/min, respectivamente. Además, los autores concluyen que para aumentar la velocidad de refinación del aluminio se necesitaría aumentar el flujo de gas, pero este aumento en el flujo de gas necesitaría a su vez un aumento en la velocidad de rotación del rotor, lo cual resulta contraproducente ya que esto forma remolinos y la mezcla gas- metal resultante no sería uniforme.

Los resultados del modelo físico los verificaron con el modelo matemático, en el cual corroboraron que la desgasificación del aluminio es de carácter difusional y está controlado por el transporte de materia en la fase líquida del metal. El modelo matemático utilizado es el de Sigworth y Engh donde el parámetro importante es el número adimensional Ψ/ct , ya que este número permite dar algunas conclusiones acerca de la etapa controlante del proceso analizado bajo condiciones industriales.

David Neff, Metallics Systems, Solon, Ohio ^[9] da una visión general de cuales son los efectos dañinos del hidrogeno y distinguen entre la porosidad debida a un rechupe con la porosidad debida a la absorción de hidrógeno. También ilustran gráficamente (figura 9) las eficiencias de los diferentes métodos de desgasificación, los cuales son tres: lanza, tapón poroso y rotor inyector, en donde se observa que el rotor inyector es por mucho el más eficiente.

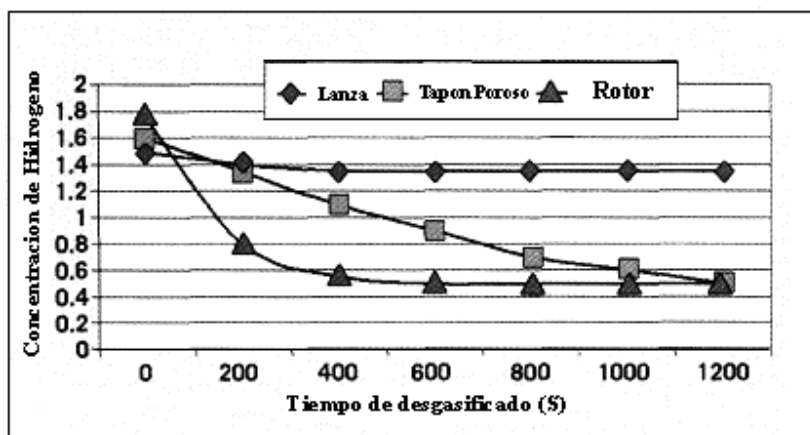


Figura 9. Comparación de las eficiencias de desgasificado de tres técnicas diferentes: lanza, tapón poroso y rotor inyector.

Neff concluye que la porosidad debida a rechupe es más dañina que la porosidad debida a gas, ya que la porosidad debida a rechupe tiene morfologías puntiagudas y dispersas, mientras que la porosidad debida a gas tiene morfologías redondas y semiesféricas uniformemente distribuidas.

El problema de la porosidad por rechupe se debe a una mala alimentación de metal en la pieza, ya que la solidificación del aluminio involucra un cambio en el volumen del 6% y para compensar esta falta de metal se diseñan alimentadores los cuales como su nombre lo dice alimentan metal líquido a la pieza en las zonas donde hace falta. Estas zonas que son las ultimas en solidificar se deben identificar para diseñar adecuadamente el sistema de alimentación, lo cual depende de la geometría de cada pieza.

Para solucionar el problema de la porosidad debido al atrapamiento de gases que en nuestro caso se trata del H_2 se discuten diferentes métodos de desgasificado. De los tres métodos comerciales (lanza, tapón poroso y rotor inyector) se concluye que el rotor inyector es el más eficiente. Otro aspecto importante del rotor inyector es que si se diseña una unidad

desgasificadota en la cual se pueda combinar el rotor inyector junto con fluxes, el resultado de la refinación es mucho mejor. Los fluxes son administrados en forma granular, los cuales son expulsados por los orificios del rotor que en conjunto con el gas dan como resultado un aumento en la cinética de mezclado y remoción de hidrogeno e inclusiones. Además, Neff distingue la diferencia entre gases empleados en el proceso de desgasificación como nitrógeno, argón, y halógenos (CCl_2F_2 , SF_6). Los halógenos fueron usados extensivamente en el pasado pero debido a la naturaleza tóxica y corrosiva de sus desechos, su uso ha ido disminuyendo. El nitrógeno es el mas barato de los gases, solo tiene el inconveniente de formar una escoria húmeda con un alto grado de aluminio metálico, al contrario de lo que sucede con el argón, que aunque es más caro en comparación con el nitrógeno, es mejor ya que forma una capa protectora sobre la superficie del baño, la cual evita que se forme mas óxido sobre la superficie, y al mismo tiempo evita la absorción de hidrogeno de la atmosfera.

Capítulo II. Bases para la construcción del modelo físico.

2.1 Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar y construir un modelo físico buscando el cumplimiento de los criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática, el cual va a representar el proceso de desgasificación del aluminio mediante la técnica del rotor inyector. En este modelo se podrá realizar el análisis hidrodinámico y cinético del proceso de desgasificación del aluminio y así mismo dar soluciones prácticas a la industria del aluminio en futuros trabajos.

2.2 Criterios de similitud

Para poder simular un proceso industrial con un modelo físico es necesario alcanzar ciertos parámetros de similitud, los cuales rigen o gobiernan el proceso que se quiere representar. Existen 3 parámetros fundamentales para simular la fluidinámica de cualquier proceso, que son: similitud cinemática, similitud geométrica, similitud dinámica.

2.2.1 Similitud cinemática

La similitud cinemática se deriva del término de viscosidad cinemática la cual es una propiedad intrínseca de los líquidos a fluir. La definición matemática de viscosidad cinemática es la siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

ν , es la viscosidad cinemática expresada en [m²/s]

μ es la viscosidad dinámica la cual esta expresada en [Kg/ms]

ρ es la densidad la cual esta expresada en [Kg/m^3]

En muchos estudios de modelado físico se utilizan líquidos con viscosidad cinemática similar a como es el caso del tratamiento de la refinación secundaria del acero la cual se lleva a cabo en el horno olla y se insufla argon por el fondo de la olla, en el modelado físico se utiliza agua y aire ya que la viscosidad cinemática del agua a 20°C ($1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) es la misma del acero a 1600°C . En este caso de modelar aluminio con agua este criterio es imposible de satisfacerse, aunque aún así muchos trabajos se reportan con modelos de agua para simular aluminio líquido y sus aleaciones.

2.2.2 Similitud geométrica

La similitud geométrica como su nombre lo refiere significa similitud en forma. Dos sistemas pueden ser iguales en forma pero diferentes en dimensiones. Para lograr esto se utiliza un concepto el cual se llama factor de escala y se representa por el siguiente símbolo adimensional λ , el cual sirve para poder escalar y representar en modelos físicos hornos, reactores, oleoductos, reactores de mezclando, etc.

$$\lambda = \frac{\Phi \text{Característico del modelo}}{\Phi \text{característico del reactor}}$$

donde Φ es el diámetro.

Dos sistemas son geoméricamente similares siempre y cuando λ sea constante en cualquier punto de los dos sistemas.

2.2.3 Similitud dinámica

La similitud dinámica es aquella en la cual dos sistemas van a ser similares dinámicamente siempre y cuando las fuerzas que actúan sobre los fluidos en ambos sistemas sean similares. La similitud dinámica es descrita por números adimensionales que representan cocientes de fuerzas que actúan sobre los fluidos. Cuando el campo del flujo de fluidos en un sistema es simple es fácil satisfacer la similitud dinámica ya que las variables o parámetros son limitados, más sin embargo cuando el campo del flujo de fluidos involucra mecanismos de

transferencia de masa ó energía o si ocurren ambos simultáneamente, el sistema se vuelve complejo y prácticamente es imposible alcanzar el criterio de similitud dinámica. En estos casos se utiliza un criterio de relajación en el cual solo se toman en cuenta los parámetros más importantes con lo cual se reducen variables y así se facilita la solución del problema. Para alcanzar la similitud dinámica se tienen que relacionar cierto grupo de números adimensionales que relacionen las fuerzas que gobiernan el flujo de fluidos del sistema estudiado. En el sistema del desgasificador con la técnica rotor inyector, las fuerzas involucradas son las gravitacionales, las inerciales y las boyantes.

En nuestro caso utilizaremos dos números adimensionales conocidos como el Número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas) y el Número de Froude modificado (relación entre fuerzas gravitacionales y boyantes).

La similitud dinámica se alcanza cuando se cumplen las siguientes igualdades:

$$Re_{\text{sistema}} = Re_{\text{modelo}}$$

$$Fr'_{\text{sistema}} = Fr'_{\text{modelo}}$$

El número de Reynolds se define de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho V \Phi}{\mu}$$

Donde:

ρ es la densidad del líquido [Kg/m³]

V es la velocidad característica o promedio del líquido [m/s]

Φ es el diámetro característico del reactor [m]

μ es la viscosidad del líquido [Kg/ms]

El significado físico del Número de Reynolds es el cociente entre fuerzas inerciales y fuerzas viscosas:

$$\text{Re} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

El número de Froude modificado se define de la siguiente forma:

$$\text{Fr}' = \frac{\rho_g U_p^2}{(\rho_l - \rho_g) * g * \Phi}$$

Donde:

ρ_g es la densidad del gas inyectado en $[\text{Kg}/\text{m}^3]$

U_p^2 es la velocidad de ascenso del gas en $[\text{m}^2/\text{s}^2]$

ρ_l es la densidad del líquido $[\text{Kg}/\text{m}^3]$

g es la aceleración de la gravedad $[\text{m}/\text{s}^2]$

Φ es el diámetro característico del reactor $[\text{m}]$

El significado físico del Número de Froude modificado es el cociente entre fuerzas boyantes y fuerzas gravitacionales:

$$\text{Fr}' = \frac{\text{fuerzas gravitacionales}}{\text{fuerzas boyantes}}$$

Capítulo III. Desarrollo experimental

3.1 Metodología experimental

El modelo físico que se construye debe simular el proceso de desgasificación del aluminio mediante la técnica del rotor inyector. Este modelo a escala 1/1 se diseñó en base al reactor industrial utilizado por Cooper Crouse Hinds. Para el diseño e instrumentación del prototipo se contó con la ayuda de los ingenieros José Luis Camacho y Renato Trejo del Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro (CIATEQ), apegándose lo más posible al diseño del reactor industrial (ver figura 10).



Figura 10. Reactor Industrial.

Para la construcción del modelo se utilizaron los materiales y equipos listados en la tabla 4.

Tabla 4. Lista de materiales y equipos para la construcción del modelo físico.

9 metros de PTR estructural de 2"
1 barra de Nylamid de 51mm de diámetro x 579mm de largo
1 motor de C.A. de $\frac{3}{4}$ de H.P. Surtek®
1 tubo de acero A-36 de 63mm de diámetro x 432mm de largo
1 junta rotativa Deublin®
2 chumaceras de 50mm diámetro SKF®
3 cilindros de Nylamid de 18cm de diámetro x 5cm de espesor
3 poleas de aluminio
2 bandas automotrices de 10mm X 730mm
1 cilindro de Plexiglás enchaquetado
1 flujómetro de 0-150 l/min Cole Palmer®
Pegamento para acrílico ADECRYL®
Pegamento anaeróbico para ajustes Loctite®
1 seguro circlip exterior de 50 mm
1 cinta teflón
1 cople de acero
1 cople de bronce
8 metros de manguera para alta presión
1 conexión rápida para gas hembra de $\frac{3}{8}$ "
1 Kg. de electrodos E-6013 de $\frac{1}{8}$
4 tornillos de $\frac{1}{2}$ " x $1 \frac{1}{2}$ " -13H
4 rondanas automotrices de $\frac{1}{2}$ "
4 rondanas de presión de $\frac{1}{2}$ "
3 latas de pintura en aerosol
4 regatones de 2" de diámetro
1 espárrago de $\frac{3}{8}$ "
2 tornillos hexagonales de $\frac{1}{2}$ " x 2" -13H
Tacómetro digital Lutron DT-2236®
Oxímetro digital HANNA Instruments HI 9146®

3.2 Etapas de construcción

Todos los materiales anteriormente mencionados se maquinaron y acondicionaron en el taller mecánico del departamento de Ingeniería Metalúrgica. La construcción del modelo se llevó a cabo en varias etapas, que se señalan a continuación:

- Fabricación de la base estructural
- Fabricación del soporte de flecha y motor
- Fabricación de la flecha rotatoria
- Maquinado de rotores

3.2.1 Fabricación de base estructural

La base estructural se construyó en base a los planos de la figura 11.

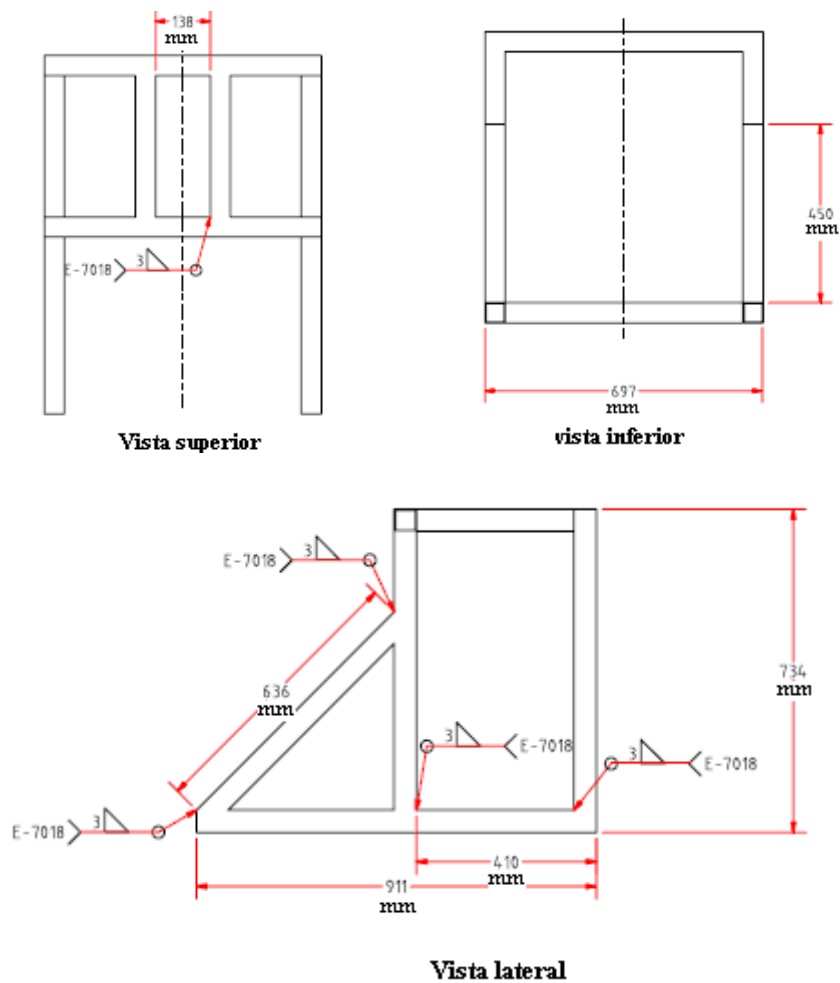


Figura 11. Planos para la fabricación de la base estructural

Para la construcción de esta base se utilizó el PTR estructural de acero de 2", el cual se cortó en la cortadora alternativa. Después de hacer todos los cortes necesarios se continuó con la unión de estos, la cual se hizo con soldadura de arco eléctrico, en la cual se utilizó una intensidad de corriente de 220 Amperes con electrodos de 1/8 E-6013. Una vez soldados los tramos de PTR, se prosiguió a esmerilar los excesos de soldadura para lograr un mejor aspecto superficial. Por último se pintó con aerosol la estructura para evitar los efectos de la corrosión. Algunas etapas de la fabricación de la estructura se presentan en la figura 12.



Figura 12. Construcción de la base estructural

3.2.2 Fabricación del soporte de la flecha y soporte del motor

Para la fabricación del soporte se utilizaron 2 placas de acero A-36 de 400mm x 150mm con un espesor de $\frac{1}{4}$ ", las cuales se unieron a una tercera placa de 200 mm x 300 mm con un espesor de $\frac{1}{2}$ ". A esta última placa se le hicieron 4 barrenos con cuerda ya que en estos barrenos van a ir sujetas las chumaceras tal y como se muestra en la figura 13.

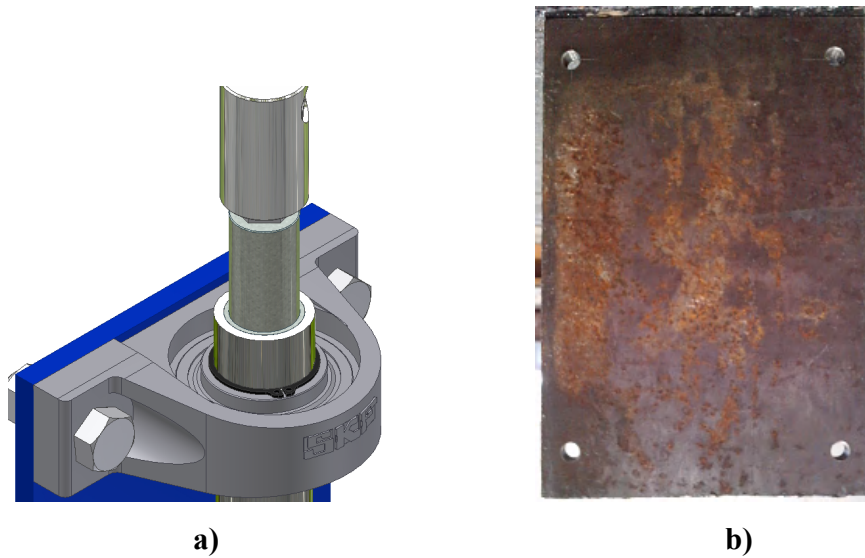


Figura 13.a) Chumaceras. b) Placa barrenada donde van sujetas las chumaceras

Las chumaceras tienen la función de sujetar y servir como eje de giro para la flecha rotatoria, evitando vibraciones. En el lado opuesto de la placa con las chumaceras se soldó un anillo de acero de 5" de diámetro exterior y 3" de diámetro interno. A este anillo se le hizo un barreno transversal con cuerda y se le colocó un tronillo de ajuste. La función de este anillo es posicionar el soporte a diferentes alturas y así poder analizar el efecto de la profundidad de inmersión de la flecha junto con el rotor dentro del líquido.

En las fotografías de la figura 14 se muestra el anillo posicionador así como el barreno donde va el tornillo de ajuste. En la figura 14 se observa el arreglo de las 3 placas.

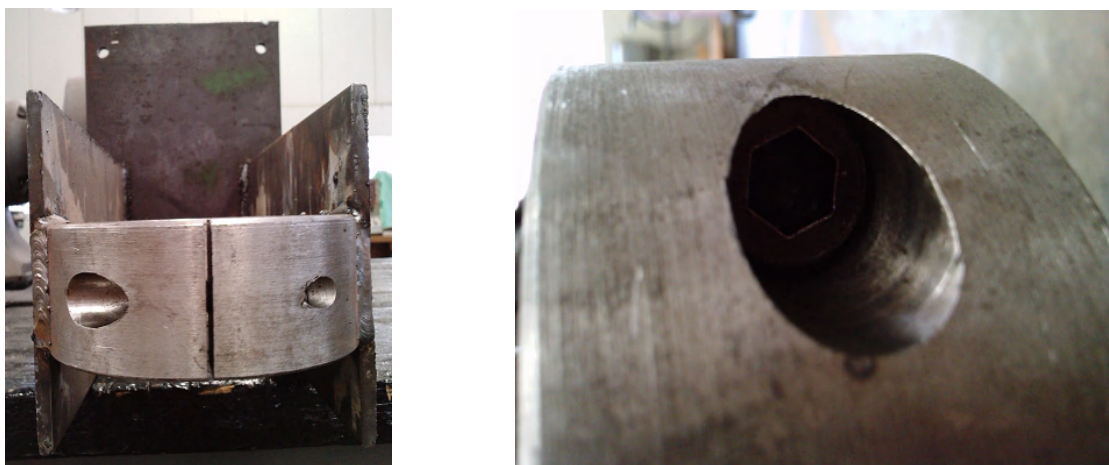


Figura 14. Anillo posicionador de la altura de la flecha

El anillo que se mencionó anteriormente va sujeto a un tubo de acero inoxidable de 5" de diámetro externo. Este tubo se rellenó con una mezcla de concreto para evitar que se flexionara debido al peso de la flecha y el rotor instrumentado. En las fotografías de la figura 15 se muestra el tubo de acero inoxidable que tiene la función de poste de sujeción para el soporte de flecha y motor así como también el relleno de concreto que se le colocó al tubo para evitar su flexión.



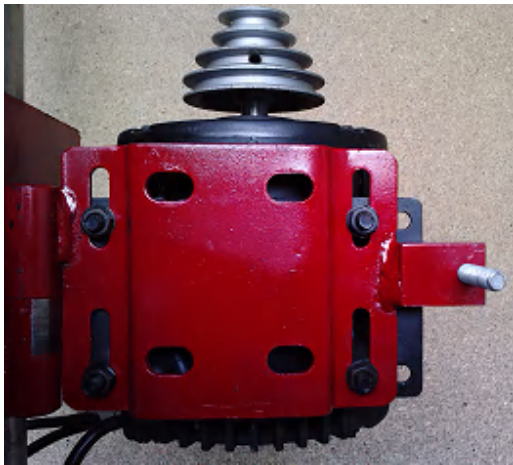
a) Vista lateral



b) Vista superior (concreto colocado)

Figura 15. Tubo de acero inoxidable que va sujeto el soporte

En un costado del soporte se soldó una bisagra de 1" de diámetro junto con la base del motor de $\frac{3}{4}$ de HP. La función de esta bisagra es tensionar las bandas del motor junto con las de la flecha rotatoria. En la figura 16 se muestra la base tensora del motor junto con este.



a)



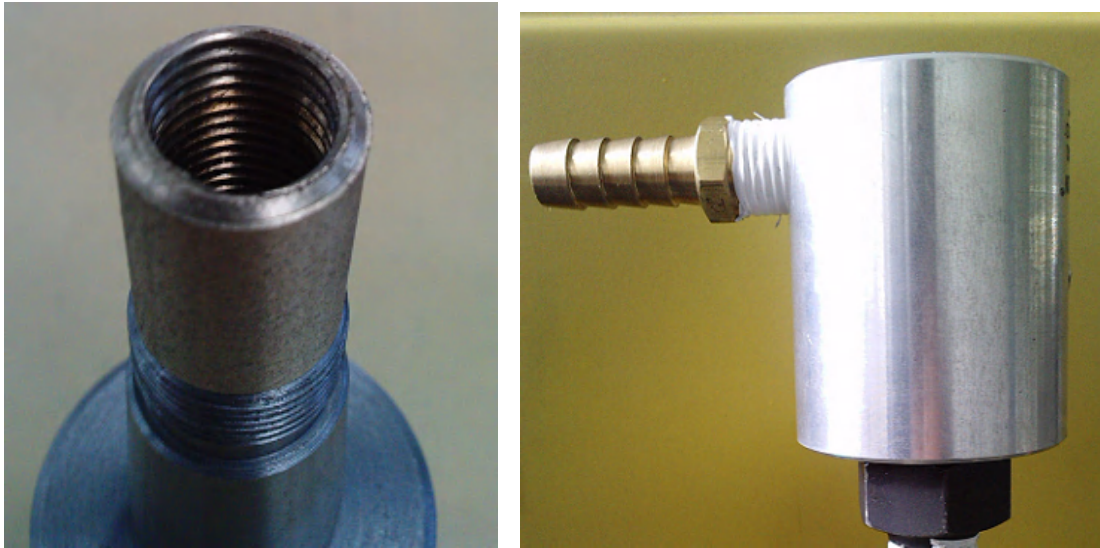
b)

Figura 16. a) Base tensora del motor. b) Motor

3.2.3 Fabricación de la flecha rotatoria

La flecha rotatoria se divide en tres partes. La primera parte es la parte superior que es la junta rotativa, la segunda parte es la parte media de la flecha que es el tubo de acero A-36 y la tercera parte de la flecha, que es la parte inferior, es la barra de Nylamid junto con el rotor.

La parte superior, que es la junta rotativa, tiene la función de inyectar el gas al modelo, el cual fluye a través del tubo de acero y también a través de la barra de Nylamid y del rotor por donde se descarga el gas. Esta junta rotativa está compuesta por dos coples, el primer cople que es el de bronce se maquinó para hacerle una cuerda interna que es donde va atornillada a la junta rotativa, por donde entra el gas tal y como se muestra en la figura 17.



a)

b)

Figura 17. a) Cople de bronce. b) Junta rotativa

El segundo cople, que es de acero, sirve para introducir la junta a presión en la polea, la cual hace girar a la flecha rotatoria y que se unió al cople de bronce mediante el uso de un pegamento anaeróbico. La figura 18 ilustra estas uniones.



a)

b)

c)

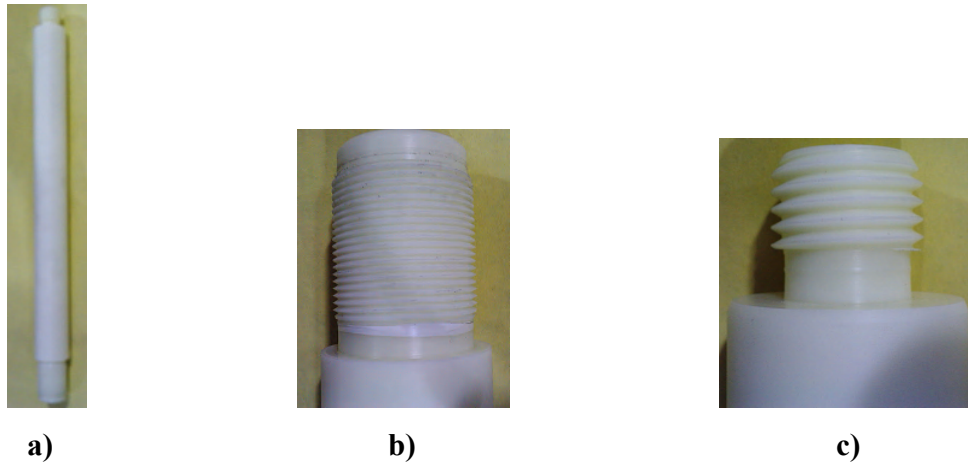
Figura 18. a) Cople de acero. b) Cople de acero unido al cople de bronce. c) Cople unido con la polea.

Continuando con la fabricación de la flecha rotatoria sigue la parte media de la flecha que es el tubo de acero A-36 de 50 mm de diámetro exterior, el cual se maquinó en el torno para hacerle una cuerda interna en el extremo donde va ir sujeta la parte inferior de la flecha rotatoria que es la barra de Nylamid junto con el rotor. Este maquinado se ilustra en la figura 19.



Figura 19. Maquinado de la parte media de la flecha rotatoria.

La última parte de la flecha es la barra de Nylamid, la cual se barrenó de extremo a extremo con una broca de $\frac{1}{2}$ ”; en un extremo se le hizo una cuerda exterior en la cual se va a enroscar el tubo de acero y del otro lado también se le hizo una cuerda exterior por donde va a ir enroscado el rotor. La flecha de Nylamid y las dos roscas mencionadas se muestran en las fotografías de la figura 20. En todas las uniones entre la barra de Nylamid, el tubo de acero y el rotor se utilizó cinta teflón para sellar y evitar fugas de aire.



**Figura 20. a) Flecha de Nylamid. b) Cuerda para la unión del tubo de acero.
c) Cuerda para rotor.**

3.2.4 Maquinado de rotores

Para maquinar los rotores también se utilizó Nylamid, ya que este material se puede maquinar con las herramientas con las que se maquina acero u otros materiales comunes. Los rotores de Nylamid de 18cm de diámetro x 5cm de altura se maquinaron en la fresadora. La fresadora y el rotor maquinado de Nylamid se muestran en las fotografías de la figura 21.

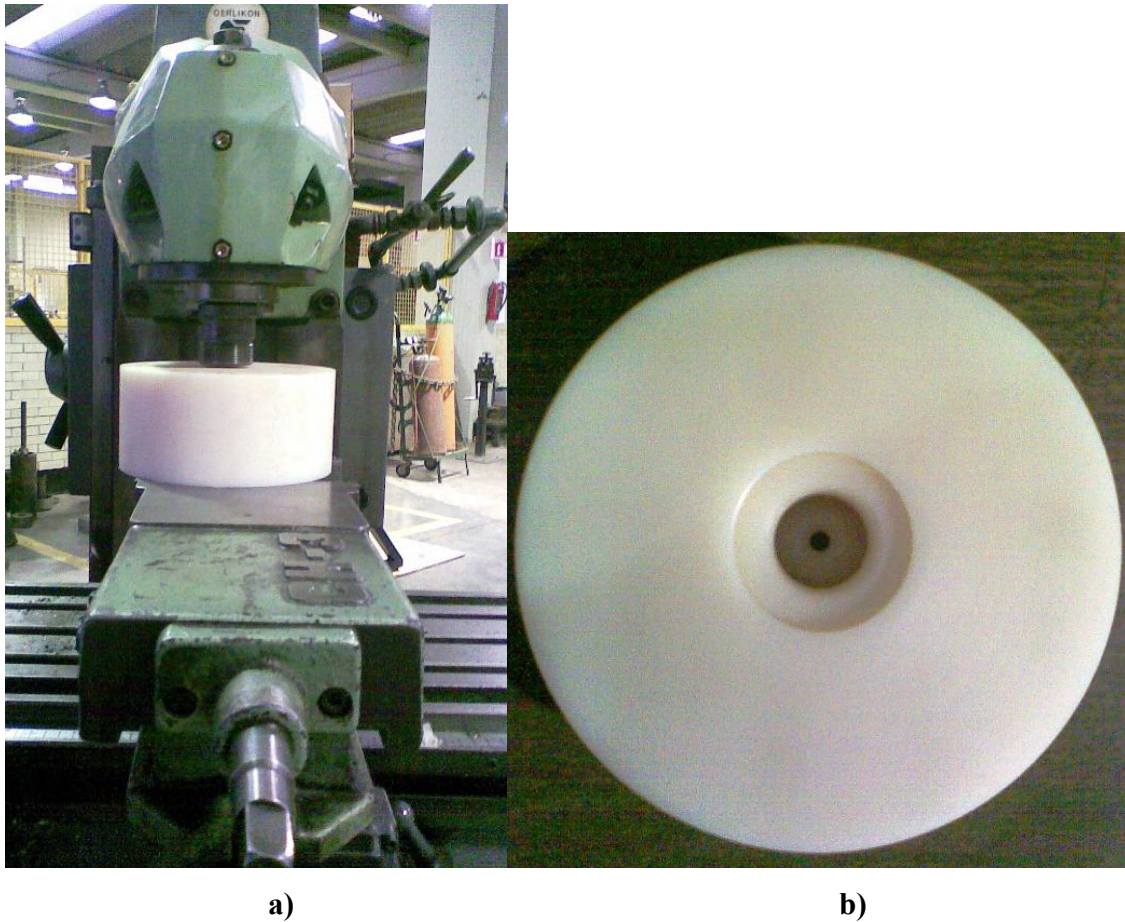
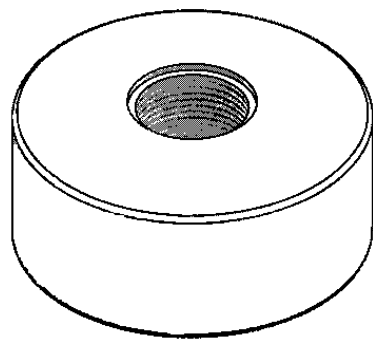
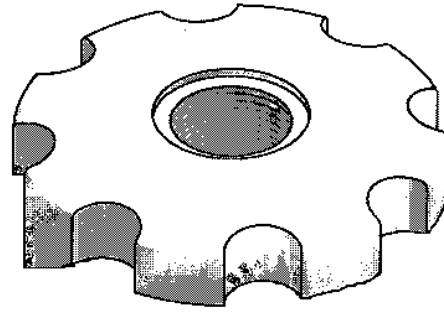
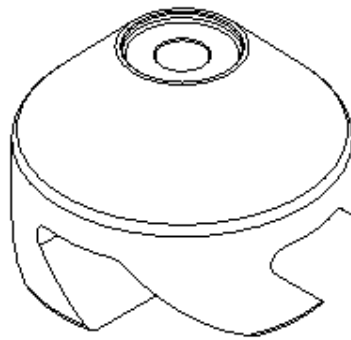


Figura 21. a) Fresadora. b) Rotor Maquinado (liso)

Se diseñaron tres tipos diferentes de rotores: uno liso, uno estriado que es el que se utiliza industrialmente y otro diseño alternativo. Estos diseños se muestran esquemáticamente en la figura 22.

**a) Rotor liso****b) Rotor Estándar****c) Rotor Alternativo****Figura 22. Diseño de los rotores**

El diferente diseño de los rotores se hizo principalmente con el objetivo de comparar y analizar las diferencias entre ellos y decidir cual es el mas eficiente en un trabajo futuro, ya que de estos rotores dependen variables las cuales influyen severamente en el proceso de desgasificado tales como: tamaño de burbuja, dispersión de las burbujas así como también la turbulencia y los patrones de flujo generados en el liquido.

Capítulo IV. Resultados y discusión.

4.1 Escalamiento de las dimensiones del reactor

El modelo físico construido en este trabajo se basó en el reactor industrial utilizado en la compañía Cooper Crouse Hinds. El modelo físico se diseñó utilizando un factor de escala $\lambda = 1$, donde:

$$\lambda = \frac{\Phi_{\text{Característico del modelo}}}{\Phi_{\text{característico del reactor}}}$$

Donde Φ es el diámetro.

El factor de escala más común es 1 debido a que la viscosidad cinemática (ν) del aluminio a 700°C no es la misma que la del agua a 20°C por lo cual no se puede escalar el reactor a un tamaño más pequeño que el del reactor industrial. Aunque no se cumple este criterio de similitud se sigue utilizando agua en la mayoría de modelos reportados en la literatura por su fácil manejo y buena visibilidad. En la mayoría de modelos se han reportado buenas predicciones con agua, aunque la extrapolación de resultados obtenidos con el modelo al reactor industrial debe ser cuidadosa.

En otro tipo de modelos físicos relacionados con la fluidinámica entre metales y gases, como es el caso del proceso de refinación secundaria del acero o mejor conocida como metalurgia de la olla, si se puede escalar el tamaño del reactor industrial ya que la viscosidad cinemática (ν) del acero a 1600°C es idéntica a la del agua a 20°C, por lo cual si es posible escalarlo.

La mayoría de los modelos físicos reportados en la literatura relacionados a la desgasificación del aluminio, se hicieron basándose en reactores industriales como es el caso de la investigación de M.Rey y col ^[6] mencionada anteriormente en el Capítulo I.

En la tabla 5 se muestran las dimensiones del reactor real y las del modelo construido en este trabajo basado en un reactor industrial de la empresa Cooper Crouse Hinds. El escalamiento λ del reactor se hizo 1:1. La única diferencia fue en la altura y diámetro debido a que el reactor industrial está recubierto por refractario lo cual aumenta su tamaño con respecto al

modelo físico, pero el volumen del líquido contenido en el reactor industrial (aluminio) es el mismo que el modelo físico (agua).

Tabla 5. Dimensiones de reactores.

	Altura (cm)	Diámetro interno (cm)	Diámetro externo (cm)
Reactor Industrial	106	52	130
Modelo Físico	63	52	54

4.2 Escalamiento de la velocidad de rotación del rotor y del flujo de gas al modelo físico

Para el cálculo del flujo de gas y velocidades de rotación en el modelo se utilizaron también datos de flujos inyectados y velocidades angulares industriales proporcionados por la empresa Cooper Crouse Hinds. A continuación se muestran las ecuaciones para el escalamiento de la velocidad de rotación y del flujo de gas.

Velocidad de rotación

Factor de escala:

$$\lambda = \frac{\Phi_m}{\Phi_{f.s}} \dots\dots\dots 1$$

Similitud dinámica igualando el número de Reynolds entre el sistema y el modelo físico:

$$\frac{\rho_{fs} * V_{fs} * \Phi_{fs}}{\mu_{fs}} = \frac{\rho_m * V_m * \Phi_m}{\mu_m} \dots\dots\dots 2$$

Despejando la velocidad característica en el modelo físico de la ecuación 2:

$$V_m = \frac{\mu_m * \rho_{fs} * V_{fs} * \Phi_{fs}}{\mu_{fs} * \rho_m * \Phi_m} \dots\dots\dots 3$$

Aplicando las definiciones de viscosidad cinemática y factor de escala, la ecuación 3 queda:

$$V_m = \left(\frac{\nu_m}{\nu_{fs}} \right) * \lambda^{-1} * V_{fs} \dots\dots\dots 4$$

Las siguientes dos ecuaciones sirven para transformar las velocidades angulares en revoluciones por minuto para el reactor y para el modelo físico a velocidades angulares en metros por segundo.

$$V_{fs} = (RPM_{fs} * \Phi_{rotorfs} * \pi) \dots\dots\dots 5$$

$$V_m = (RPM_m * \Phi_{rotorm} * \pi) \dots\dots\dots 6$$

Sustituyendo las ecuaciones 5 y 6 en la ecuación 4, se obtienen la siguiente expresión:

$$(RPM_m * \Phi_{rotorm} * \pi) = \left(\frac{V_m}{V_{fs}} \right) * \lambda^{-1} * (RPM_{fs} * \Phi_{rotorfs} * \pi) \dots\dots\dots 7$$

Despejando de la ecuación 7 la velocidad de rotación del modelo físico se obtiene:

$$RPM_m = \frac{V_m}{V_{fs}} * \lambda^{-1} * RPM_{fs} * \frac{\Phi_{rotorm}}{\Phi_{rotorfs}} \dots\dots\dots 8$$

Y aplicando la definición del factor de escala λ , la ecuación 8 se transforma a la ecuación 9 que representa el escalamiento para la velocidad de rotación en el modelo basado en la velocidad de rotación del reactor industrial con lo cual se satisface el criterio de similitud dinámica dada por el número de Reynolds:

$$RPM_m = \frac{V_m}{V_{fs}} * \lambda^{-2} * RPM_{fs} \dots\dots\dots 9$$

Con la ecuación 9 se realizaron los cálculos de las velocidades de rotación aplicadas al modelo físico.

Flujo de gas

Partiendo del criterio de similitud dinámica para flujos promovidos por fuerzas boyantes como es el caso del ascenso de burbujas de gas en líquidos, el cual es el número modificado de Froude, dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{Up_m^2}{g\Phi_m} = \frac{Up_{fs}^2}{g\Phi_{fs}} \dots\dots\dots 10$$

Despejando la velocidad de ascenso de las burbujas en el modelo y aplicando la definición del factor de escala, se obtiene:

$$Up_m^2 = Up_{fs}^2 * \lambda \dots\dots\dots 11$$

Sacando raíz cuadrada a la ecuación 11:

$$Up_m = \lambda^{1/2} * Up_{fs} \dots\dots\dots 12$$

La definición de la velocidad de ascenso puede escribirse empíricamente como sigue ^[10]:

$$Up = \frac{4.5 * Q^{1/3} * L^{1/4}}{R^{1/4}} \dots\dots\dots 13$$

La cual puede extenderse para expresar la velocidad de ascenso de las burbujas en el modelo físico y en el reactor como sigue:

$$Up_m = \frac{4.5 * Q_m^{1/3} * L_m^{1/4}}{R_m^{1/4}} \dots\dots\dots 14$$

$$Up_{fs} = \frac{4.5 * Q_{fs}^{1/3} * L_{fs}^{1/4}}{R_{fs}^{1/4}}$$

Sustituyendo las ecuaciones 14 en la ecuación 12 y despejando el flujo de gas en el modelo físico Q_m , se obtiene:

$$Q_m^{1/3} = \lambda^{1/2} * Q_{fs}^{1/3} * \left(\frac{R_m}{R_{fs}}\right)^{1/4} * \left(\frac{L_{fs}}{L_m}\right)^{1/4} \dots\dots\dots 15$$

Donde el flujo gas para escalar el modelo está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_m = \lambda^{3/2} * Q_{fs} \dots\dots\dots 16$$

Las ecuaciones 9 y 16 representan los escalamientos para la velocidad de rotación y flujo de gas del sistema industrial al modelo físico y la lista de símbolos que aparecen en las ecuaciones se presenta a continuación:

- Φ_{fs} = Diámetro del reactor [cm]
- Φ_m = Diámetro del modelo físico [cm]
- λ = factor de escala adimensional
- V_{fs} = Velocidad del rotor en el reactor [m/s]
- V_m = Velocidad del rotor en el modelo [m/s]
- ρ_m = densidad del agua [kg/m³]
- ρ_{fs} = densidad del aluminio [kg/m³]
- μ_m = Viscosidad dinámica del agua [Kg/ms]
- μ_{fs} = Viscosidad dinámica del aluminio [Kg/ms]
- ν_m = Viscosidad cinemática del agua [m²/s]
- ν_{fs} = Viscosidad cinemática del aluminio [m²/s]
- $\Phi_{rotor\ fs}$ = Diámetro del rotor en el reactor [cm]
- $\Phi_{rotor\ m}$ = Diámetro del rotor en el modelo físico [cm]
- RPM_m = Velocidad de rotación del modelo físico [rpm]
- RPM_{fs} = Velocidad de rotación del reactor [rpm]
- Up_{fs} = Velocidad de ascenso del Ar en el reactor [m/s]
- Up_m = Velocidad de ascenso del aire en el modelo [m/s]
- g = constante gravitacional [9.81 m/s²]
- L_{fs} = Altura del aluminio líquido en el reactor [cm]
- L_m = Altura del agua en el modelo [cm]
- R_m = Radio del modelo [cm]
- R_{fs} = Radio del reactor [cm]
- Q_{fs} = Flujo de gas Ar en el reactor [m³/s]
- Q_m = Flujo de aire en el modelo [m³/s]
- σ = tensión superficial [N/m]
- Re_{fs} = número de Reynolds del reactor
- Re_m = número de Reynolds del modelo físico

4.3 Propiedades físicas de los materiales

Las propiedades físicas tanto del aluminio como del agua son diferentes e intrínsecas para cada uno de ellos, así como también las propiedades del argon y del aire. En la tabla 6 se muestran las propiedades físicas de estos materiales a la temperatura de operación.

Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales

	ρ (kg/m ³)	μ (Kg/ms)	ν (m ² /s)	σ (N/m)
Aluminio 700°C	2380	1.284X10 ⁻³	5.395 X 10 ⁻⁷	0.9
Agua 20°C	1000	1.01 X 10 ⁻³	1X 10 ⁻⁶	0.07
Argon 20°C	1.78	-----	-----	-----
Aire 20°C	1.185	-----	-----	-----

4.4 Cálculo de la velocidad de agitación

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo II, para escalar un sistema real a un modelo es necesario igualar la relación de fuerzas que predominan en el sistema, en este caso con la agitación inducida por la rotación del rotor, es necesario igualar el número de Reynolds, que determina el cociente entre las fuerzas inerciales y las viscosas. A continuación se ejemplifica como se obtiene la similitud dinámica igualando el número de Reynolds del reactor y el del modelo físico y en la tabla 7 se resumen estos escalamientos.

$$Re_{fs} = \frac{\rho V \phi}{\mu} = Re_m = \frac{\rho V \phi}{\mu}$$

$$Re_{fs} = \frac{(2380) * (3.3981) * (0.52)}{1.284E^{-4}} = Re_m = \frac{(1000) * (6.3617) * (0.52)}{1.01E^{-3}}$$

$$32753026 = 32753026$$

Tabla 7. Velocidades de agitación escaladas del reactor al modelo físico

	V (RPM)	V(m/S)
Reactor industrial	360	3.3981
Modelo	675	6.3617

4.5 Cálculo de la velocidad de ascenso del gas, diámetro de burbuja y flujo de gas.

La expresión para determinar la velocidad de ascenso de burbujas de gas a través de líquidos se obtuvo mediante relaciones empíricas reportadas por otros investigadores. Para obtener la velocidad de ascenso de las burbujas de gas se emplea la ecuación 17, propuesta por D.Saha^[10], la cual tiene sus limitaciones ya que esta ecuación está diseñada para hornos olla de acero agitados por la inyección de gases por el fondo, en los cuales se forma una pluma de gas bifásica (aire-agua o acero-argón) como se muestra en la figura 23. Cabe señalar que el flujo de gas se escala 1 a 1 con el flujo del reactor dado por la ecuación 16 y mostrado como ejemplo en la tabla 8.

Tabla 8. Flujo de gases escalados del reactor al modelo físico

	Reactor Industrial(Ar)	Modelo (aire)
Q (l/min)	20	20

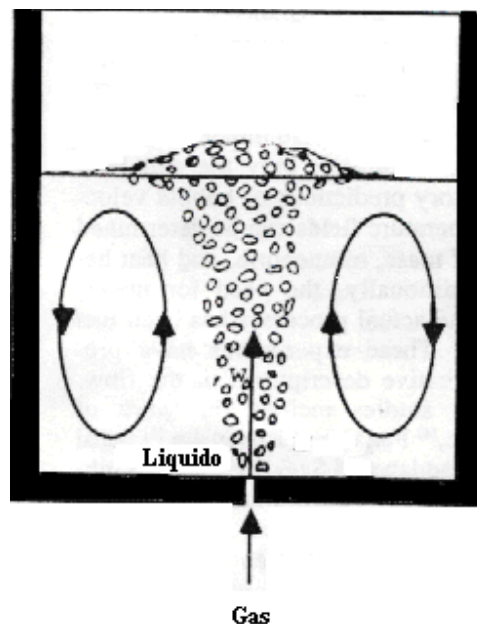


Figura 23. Esquema de ascenso de burbujas de gas en una olla de acero

$$U_p = 4.1 \frac{Q^{1/3} * L^{1/4}}{R^{1/3}} \dots\dots\dots 17$$

Donde:

Q = Flujo de gas [m³/s]

L = Altura del liquido desde el orificio de salida del gas hasta la superficie [m]

R = Radio del reactor [m]

Aunque nuestro modelo tiene inyección de gas, tiene un inconveniente que esta ecuación no considera: energías externas de agitación como el rotor inyector, ya que solo considera el ascenso libre de las burbujas sin obstáculos o fuerzas externas en el liquido, por lo cual el uso de esta ecuación solo sirve en los casos donde solamente se inyecte gas sin agitación. La tabla 9 presenta el cálculo de la velocidad de ascenso de las burbujas alcanzada para cada flujo de gas.

Tabla 9. Cálculo de la velocidad de ascenso para diversos flujos de gas

Flujo de gas (l/min)	10	20	40	60
Flujo de gas (m³/s)	1.6 E⁻⁴	3.3 E⁻⁴	6.6 E⁻⁴	1 E⁻³
Velocidad de ascenso (m/s)	0.2097	0.2670	0.3364	0.3864
L (m)	0.33	0.33	0.33	0.33

La ecuación 18 se obtuvo también mediante relaciones empíricas propuestas por M. Sano y col.^[11]. La ecuación describe el tamaño de burbuja sin limitantes como en el caso anterior ya que esta solo considera la formación de la burbuja y no su trayectoria. La tabla 10 muestra los cálculos del tamaño de burbuja estimado para cada flujo de gas.

$$d_B = 0.54 [Q_g * d_{no}^{1/2}]^{0.289} \dots\dots\dots 18$$

Donde:

d_B = diámetro de burbuja (m)

Q_g = flujo de gas (m^3/min)

d_{no} = diámetro del orificio o boquilla (m)

Tabla 10. Cálculos de los diámetros de burbuja

Flujo de gas (m^3/min)	$1.6 E^{-4}$	$3.3 E^{-4}$	$6.6 E^{-4}$	$1 E^{-3}$
Diámetro de burbuja (m)	0.0206	0.0254	0.0310	0.0350
Diámetro de boquilla (m)	$6E^{-3}$	$6E^{-3}$	$6E^{-3}$	$6E^{-3}$

4.6 Equipo experimental

El modelo físico se construyó a escala real con respecto al reactor industrial para poder estudiar los fenómenos hidrodinámicos y cinéticos del proceso de desgasificado en futuras investigaciones. Las figuras 24, 25 y 26 presentan los componentes del modelo físico en un dibujo de diseño, un diagrama esquemático del mismo mostrando el arreglo experimental y una fotografía del modelo terminado y operando, respectivamente.

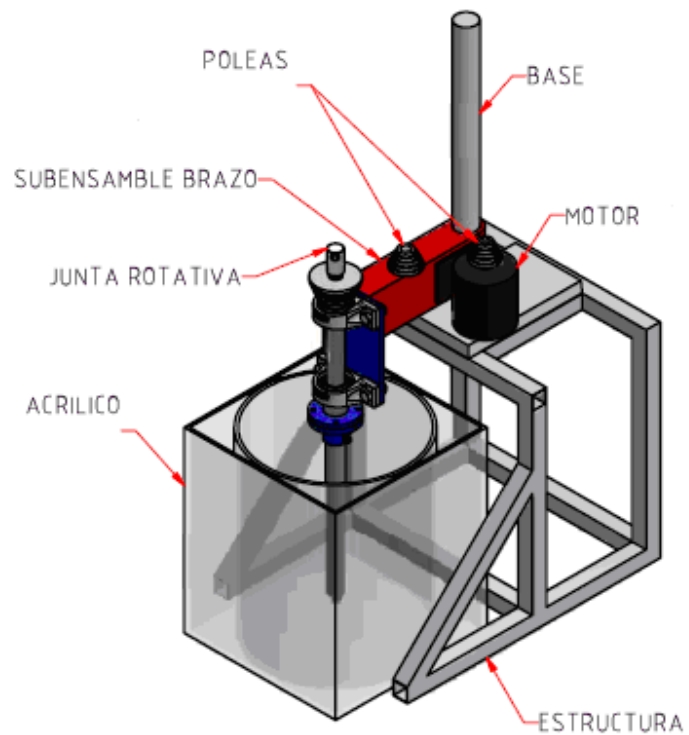


Figura 24. Diseño del modelo físico

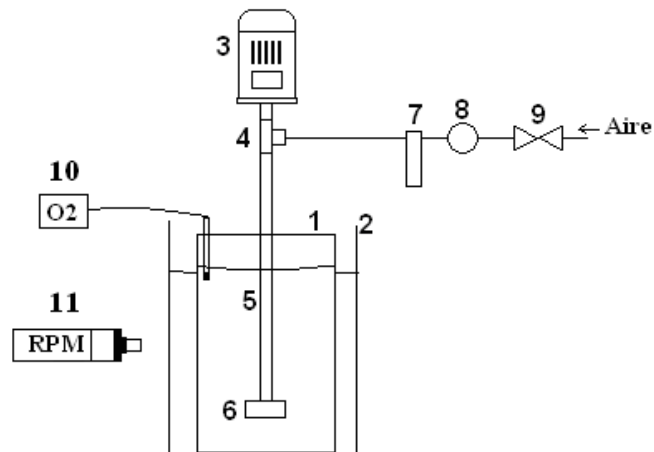


Figura 25. Arreglo experimental: 1. Reactor, 2. Recipiente externo, 3. Motor, 4. Junta rotativa, 5. Flecha de Nylamid, 6. Rotor de Nylamid, 7. Flujómetro, 8. Regulador de presión, 9. Válvula, 10. Oxímetro, 11. Tacómetro.

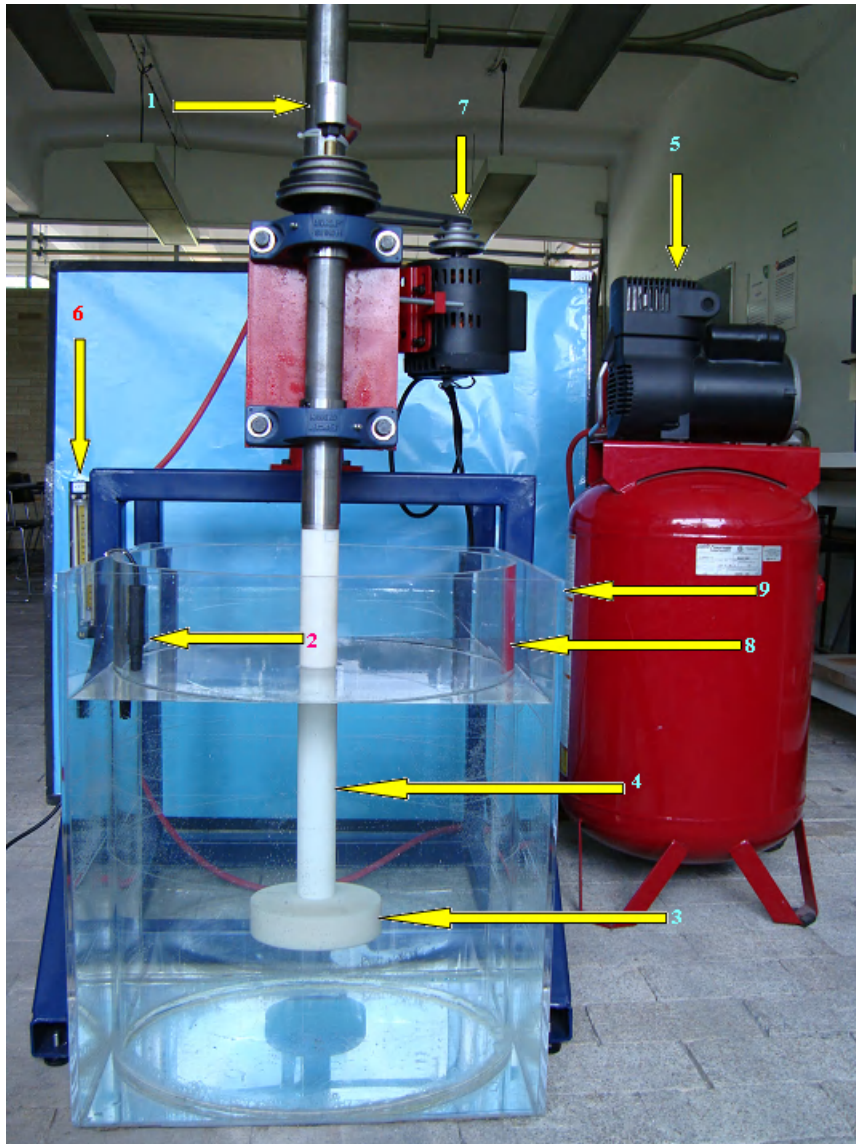


Figura 26. Instrumentación del reactor: 1. Junta rotativa, 2. Oxímetro, 3. Rotor de Nylamid (liso), 4. Flecha de Nylamid, 5. Compresor, 6. Flujómetro, 7. Motor, 8. Reactor, 9. Recipiente externo del reactor.

4.7 Pruebas preliminares

A manera de pruebas preliminares y con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento del modelo físico construido en esta tesis, se estudió el efecto de cada variable del proceso de desgasificado sobre la cinética de oxidación del agua contenida

en el reactor simulando al aluminio. Aunque la saturación de gas en el líquido es una operación contraria a la desgasificación, la cinética involucra aspectos de flujo de fluidos y transporte de masa que también aparecen en el desgasificado y por lo tanto es interesante probar este equipo con la saturación o re oxidación de agua. Entonces, en esta tesis a manera de resultados preliminares (ya que el objetivo del trabajo era solamente la construcción del modelo) se estudió la cinética de oxigenación en el agua, hasta llegar a su punto de saturación y así poder realizar un análisis semicuantitativo del proceso que indique que variables son las que más afectan a la cinética de re oxidación del agua.

4.7.1 Arreglo experimental

Se realizaron 11 pruebas experimentales preliminares de la cinética de oxidación del agua. Para realizar estas pruebas se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Se llenó el reactor con agua hasta una altura de 52cm. El nivel del agua dentro del reactor esta basado en estudios de mezclado en reactores químicos ^[12]. La figura 27 indica las dimensiones del rotor, del tanque y de la altura de la flecha, basada en la dimensión T (diámetro del tanque y altura del baño).

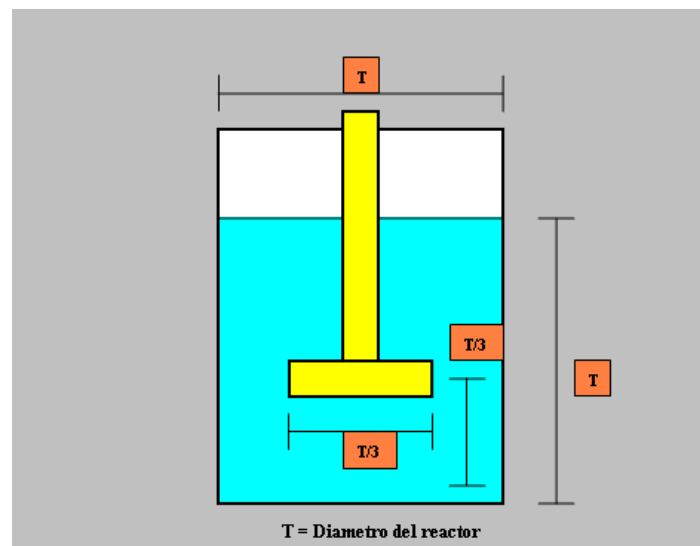


Figura 27. Esquema de las dimensiones características del sistema

- Se midió el contenido inicial de oxígeno disuelto en el agua en partes por millón (PPM) con la ayuda de un oxímetro digital HANNA Instruments HI 9146®, que se muestra en la figura 28.



Figura 28. Oxímetro digital

- Después se encendió el motor y se activó la inyección de aire. Para medir la velocidad de giro del motor se utilizó un tacómetro digital Lutron DT-2236®, el cual registra la velocidad en revoluciones por minuto (RPM), y para medir el flujo de gas (aire) se utilizó un Flujómetro de 0-150 l/min. Cole Palmer®. En la figura 29 se muestran estos dos componentes.



a)



b)

Figura 29. a) Tacómetro. b) Flujómetro

- El encendido del motor y el flujómetro se accionaron al mismo tiempo en las pruebas que así lo requirieron. El registro del tiempo se llevó a cabo con un cronometro todas las pruebas realizadas tuvieron un tiempo de duración de 3 minutos cada una.
- Todas las pruebas se realizan a la misma temperatura, se registran los datos y se grafica la concentración de O₂ contra tiempo y de esta manera se puede reportar la cinética de re oxidación.

4.7.2 Condiciones experimentales

En la tabla 11 se muestran las condiciones experimentales para cada prueba.

Tabla 11. Condiciones experimentales para el estudio de cinética de re oxidación

Prueba	Flujo (Q) [l/min]	Velocidad de rotación [RPM]	Altura del rotor (h) [cm]	Temperatura (T) [°C]
a)	10	0	16.5	26.5
b)	20	0	16.5	26.4
c)	20	294	16.5	26.2
d)	20	578	16.5	26
e)	20	675	16.5	26
f)	10	578	16.5	26
g)	40	578	16.5	26
h)	60	578	16.5	26
i)	20	1000	16.5	26
j)	20	578	10.5	26
k)	20	578	22.5	26

4.7.3 Resultados

Los resultados numéricos y gráficos se presentan en las figuras 30 - 35. En la figura 30 se presenta el efecto de la velocidad de rotación sobre la cinética de re oxidación, para lo cual en cada curva de re oxidación se varió la velocidad de rotación de 0, 294, 578, 675 y 1000 rpm, manteniendo las demás variables de proceso constantes (el flujo de gas en 20l/min, la altura del rotor a 16.5 cm del fondo y la temperatura aproximadamente a 26°C).

En la figura 31 se presenta el efecto del flujo de gas sobre la cinética de re oxidación, para lo cual en cada curva de re oxidación se varió el flujo de gas en 10, 20, 40 y 60 l/min, manteniendo las demás variables de proceso constantes (velocidad de rotación de 578rpm, la altura del rotor a 16.5 cm del fondo y la temperatura aproximadamente a 26°C).

En la figura 32 se presenta el efecto de la altura del rotor sobre la cinética de re oxidación, para lo cual en cada curva de re oxidación se varió la altura del rotor de 10.5, 16.5 y 22.5cm desde el fondo, manteniendo las demás variables de proceso constantes (velocidad de rotación de 578rpm, flujo de gas de 20 l/min y la temperatura aproximadamente a 26°C).

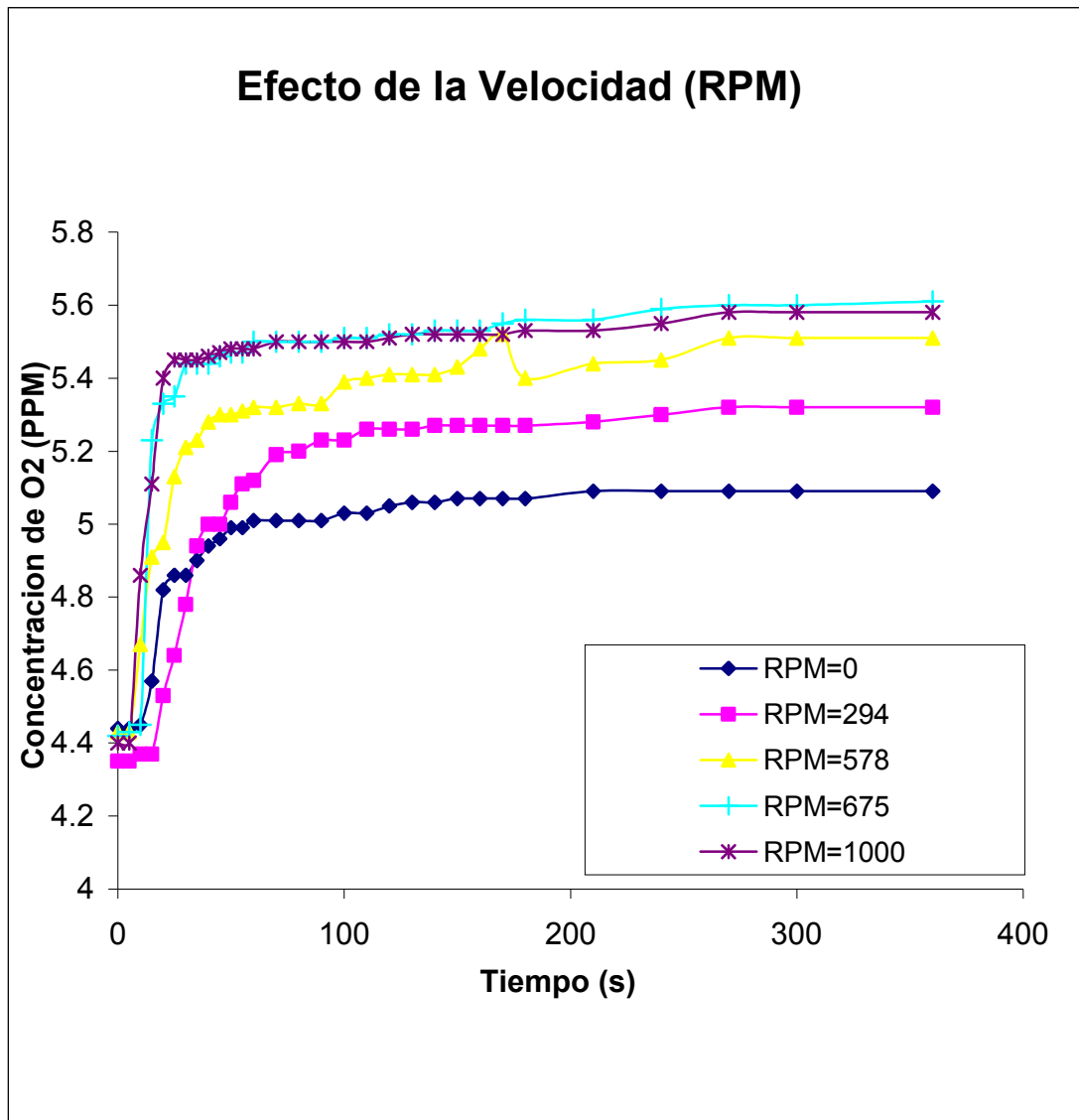


Figura 30. Efecto de la velocidad de giro del rotor sobre la cinética de re oxidación con un flujo y una altura constante de 20 l/min. y 16.5 cm respectivamente.

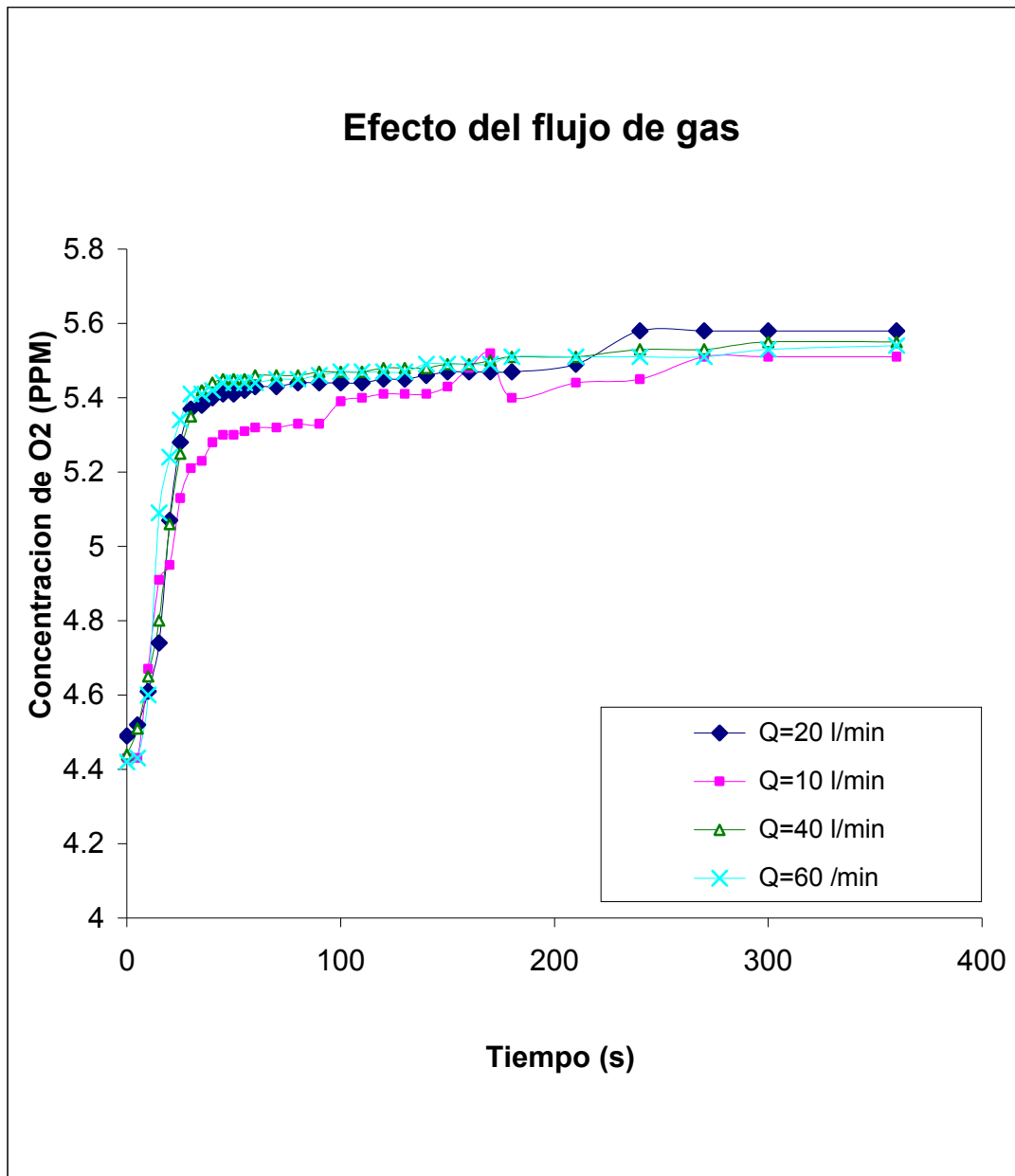


Figura 31. Efecto del flujo de gas inyectado sobre la cinética de re oxidación con velocidad y altura constante de 578 RPM y una altura de 16.5 cm.

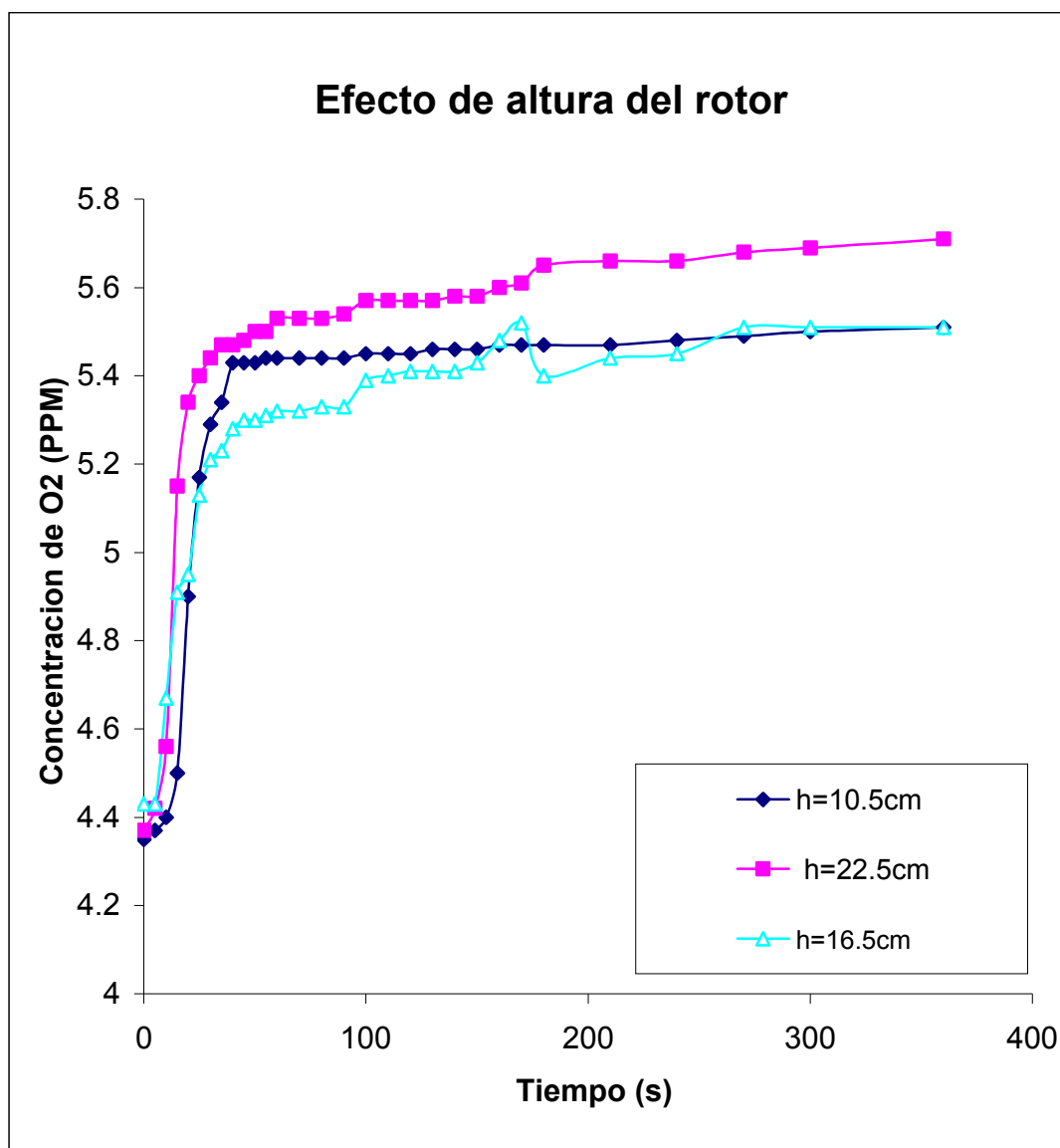


Figura 32. Efecto de altura del rotor sobre la cinética de re oxidación con una velocidad y flujo constante de 578 RPM y 20 l/min respectivamente.

En las figuras 33 a 35 se presentan fotografías del efecto del giro del rotor, flujo de gas y posición del rotor sobre el tamaño del vórtice, el tamaño y distribución de burbujas. En la figura 33 se ven fotos del sistema variando la velocidad de rotación en 0, 294, 578, 675 y 1000 rpm manteniendo los otros parámetros constantes. En la figura 34 se ven fotos del sistema variando el flujo de gas en 10, 20, 40 y 60 l/min y manteniendo los otros -

parámetros constantes. En la figura 35 se ven fotos del sistema variando la altura del rotor en 10.5, 16.5 y 22.5cm, y manteniendo los otros parámetros constantes.

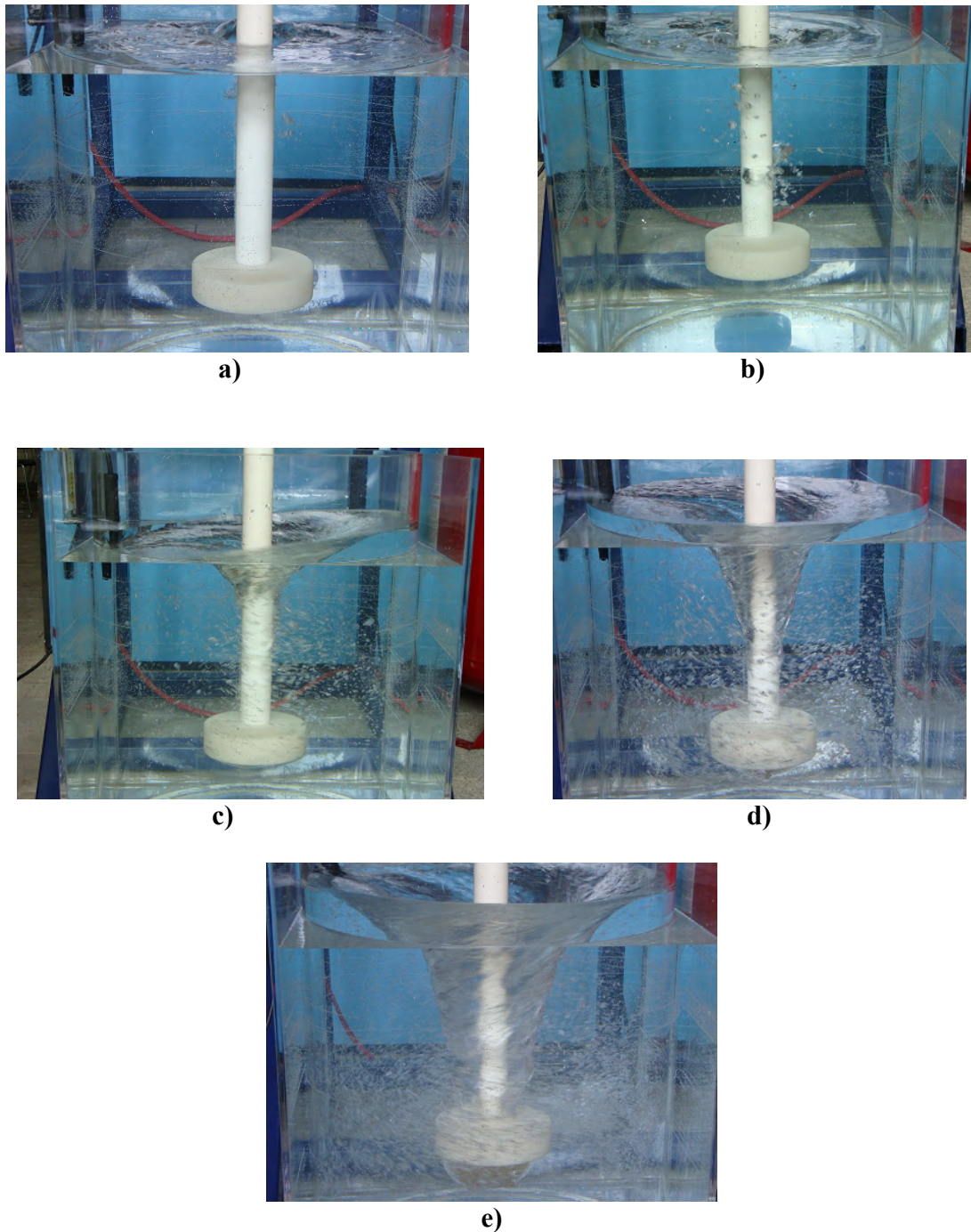


Figura 33. Efecto de la velocidad de giro: a) RPM=0; b) RPM=294; c) RPM=578; d) RPM=675; e) RPM=1000. Se mantienen constantes el flujo 20 l/min. y la altura 16.5cm:

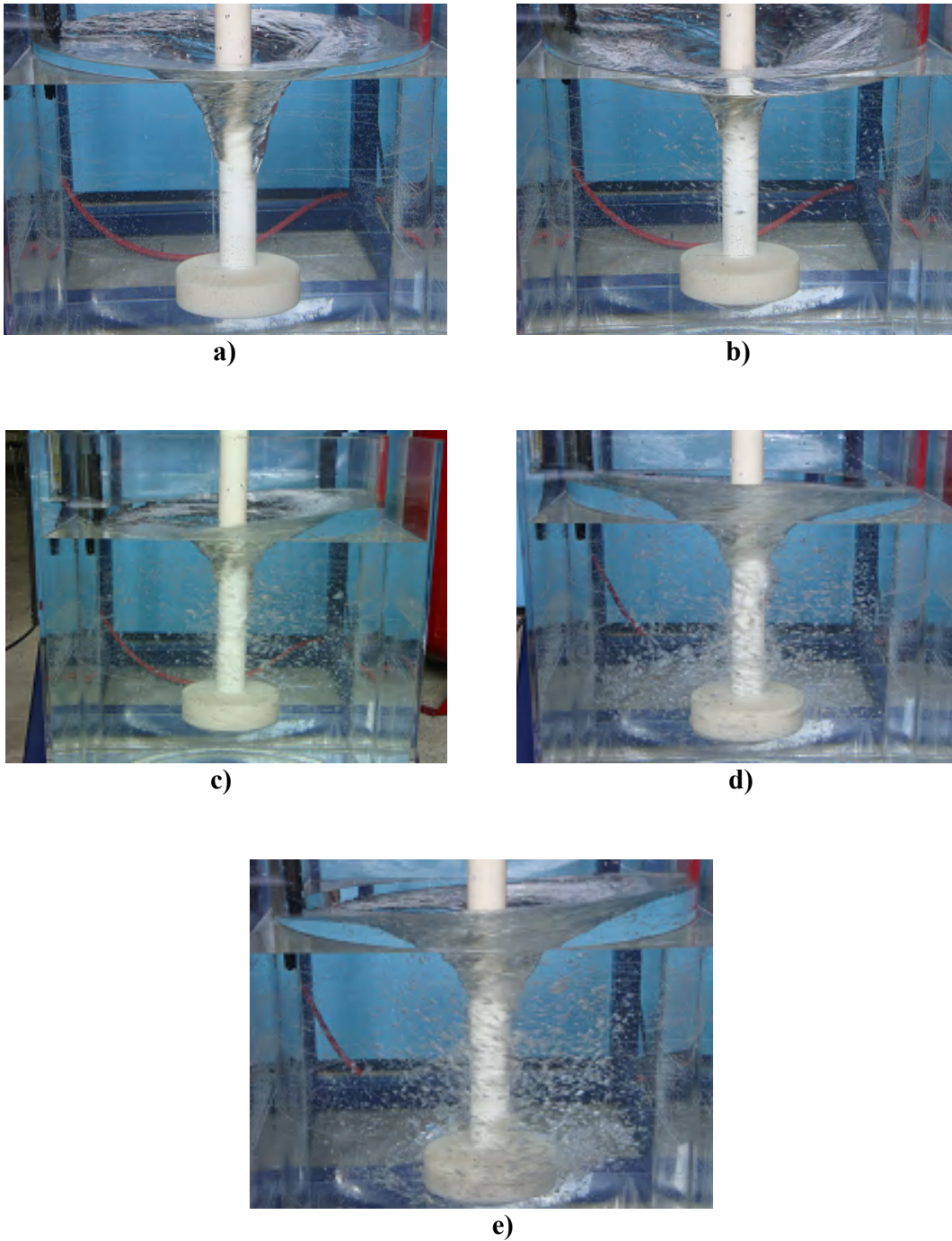
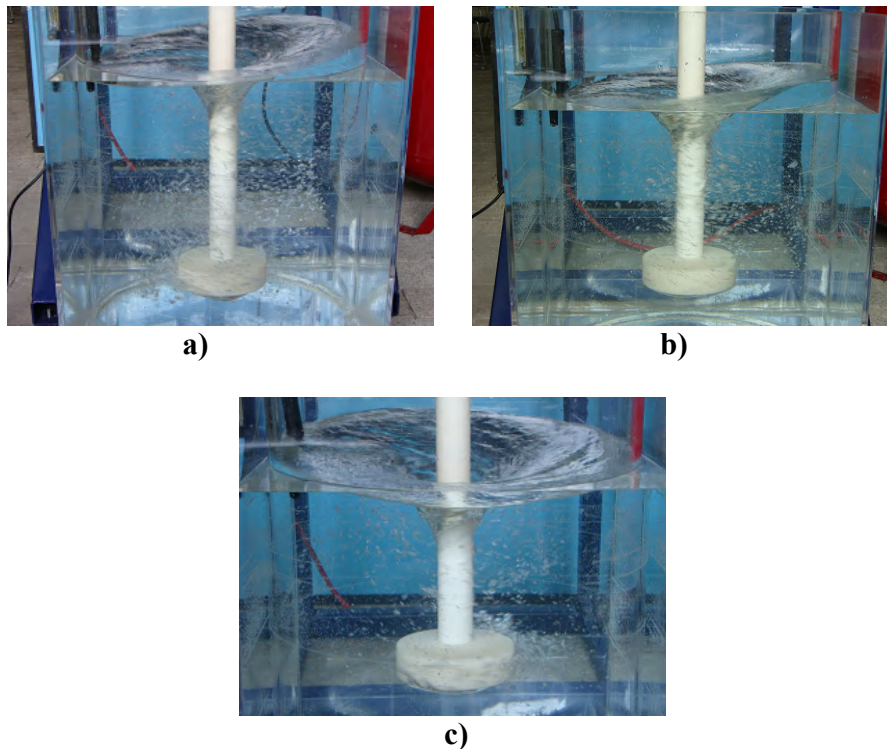


Figura 34. Efecto del flujo de gas: a) $Q = 0$ l/min; b) $Q = 10$ l/min; c) $Q = 20$ l/min; d) $Q = 40$ l/min; e) $Q = 60$ l/min. Se mantienen constantes la velocidad de giro 578RPM y la altura del rotor 16.5cm



**Figura 35. Efecto de la altura del rotor: a) $h= 10.5\text{cm}$; b) $h= 16.5\text{cm}$; c) $h= 22.5\text{cm}$.
Se mantienen constantes el flujo 20 l/min . y la velocidad de giro 578 RPM**

4.7.4 Discusión de resultados

En todos los casos experimentales se presenta un aumento en el contenido inicial de oxígeno disuelto en el agua al agitar el baño e inyectar aire a través del rotor. Este aumento termina cuando se llega a un equilibrio, ya que no hay un cambio significativo en la concentración del oxígeno en el agua y entonces se puede decir que se alcanza la saturación de oxígeno en el baño. Se considera que se alcanza un equilibrio entre el oxígeno disuelto en agua y el oxígeno gaseoso del ambiente, ya que estas pruebas se realizaron bajo condiciones experimentales controladas (presión, temperatura, velocidad de agitación). Pero si las condiciones experimentales fueran diferentes, como por ejemplo en vez de utilizar aire ($79\% \text{ N}_2$ y $21\% \text{ O}_2$) se utilizara oxígeno puro o la temperatura y presión cambiaran, la saturación de oxígeno en el agua en equilibrio con el oxígeno gaseoso cambiaría. En el caso de la velocidad de rotación se obtienen saturaciones de oxígeno distintas porque el vórtice cambia de tamaño. El aumento de oxígeno se asocia a la formación de vórtices que renueva continuamente la superficie libre del baño, lo que

facilita la absorción de oxígeno por lo que el tamaño del vórtice determina en buena medida el nivel final de oxígeno. También la inyección de aire incrementa el contenido de oxígeno.

Efecto de la velocidad de agitación

La velocidad de giro que proporciona el rotor dentro del baño es muy importante, ya que esta es la fuente principal de energía de agitación o mezclado dentro del reactor, es decir la velocidad de agitación es la principal responsable de que se genere movimiento dentro del fluido, aunque también la inyección de gas es importante en el proceso, pero esta no logra proporcionar niveles de agitación como se puede llegar a alcanzar con la velocidad de giro proporcionada por el motor y transmitida a través de la flecha y el rotor.

Como se puede apreciar en la figura 30 se ve que a mayor velocidad de giro la saturación de oxígeno en el agua se da en un menor tiempo y el nivel de saturación de oxígeno alcanzado en el baño aumenta, ya que aumenta el vórtice. Sin embargo, en el rango de velocidades de 675 RPM hasta 1000 RPM ya no hay cambio significativo en la velocidad de saturación del oxígeno ni en el nivel final de saturación. En las fotos de la figura 33 se aprecia sin agitación no hay vórtice y las burbujas son grandes y ascienden cerca del rotor, y conforme aumenta la velocidad de rotación se genera un vórtice cada vez mayor y se aprecia también con claridad en esas fotos que aumentando la velocidad de giro se disminuye el tamaño de las burbujas y las distribuye homogéneamente en todo el baño (aumenta el área interfacial burbuja/líquido). En el proceso industrial cuando se genera un vórtice grande se rompe la capa de escoria que cubre la superficie del aluminio, con lo cual se genera absorción de H_2 desde la atmósfera así como también el mezclado del metal con las inclusiones provenientes de la misma escoria y se promueve la re oxidación, lo cual es inadecuado, aunque generar burbujas pequeñas y bien distribuidas con altas velocidades de rotación es benéfico.

Efecto del flujo de gas inyectado

El efecto que tiene la inyección de gas en la re oxidación del baño no es tan significativo como lo es la velocidad de rotación, ya que en todas las curvas cinéticas de la figura 31 son muy similares. Solamente donde se logra apreciar un cambio significativo fue cuando se inyectó el flujo mínimo de 10 l/min y como consecuencia de esto la saturación del oxígeno

en el agua fue más lenta que en los otros casos, con lo cual se puede concluir que con flujos mayores a 20 l/min no habrá un cambio significativo en la cinética de re oxidación del agua. Es decir, al aumentar el flujo de aire se incrementa ligeramente la rapidez de re oxidación pero el nivel de saturación máximo permanece constante, tal y como se parecía en la figura 31.

En las fotos la figura 34 se puede observar que el flujo de gas inyectado no es un parámetro tan importante en la generación de burbujas finas como lo es la velocidad de giro, ya que aunque con mayores flujos de gas hay cada vez más burbujas, no se ve gran diferencia de tamaños de burbuja obtenidos con los diferentes flujos y sobre todo no se aprecia que se mejore la distribución de burbujas con el aumento en el flujo de gas como si se aprecia con el aumento en la velocidad de agitación.

En la inyección de gas cabe destacar que es importante el tamaño y dispersión de las burbujas y esto se debe a una combinación entre la velocidad de giro así como también el diseño del rotor. Para lograr un desgasificado eficiente se necesita generar una buena área superficial de gas inerte y esto se logra generando burbujas muy finas así como también un tiempo de residencia apropiado, procurando que este tiempo de residencia sea el mayor posible.

Efecto de la altura del rotor

La profundidad de inmersión del rotor dentro del reactor es una variable importante, ya que el tiempo de residencia de las burbujas se ve afectado, ya que a una mayor profundidad del rotor el tiempo de residencia crece porque la burbuja va a recorrer una mayor distancia, lo cual resulta benéfico para el proceso, ya que las burbujas van a lograr tener un mayor tiempo de residencia en el baño, aumentando así la eficiencia del desgasificado. En la figura 32 se ven cinéticas de re oxidación similares para los distintos casos de altura de rotores y lo único distinto es el nivel de saturación, siendo mayor a mayor altura del rotor. Esto se puede explicar si se observan las fotos de la figura 35 donde se aprecia mayor vórtice a mayor altura. Aparentemente este vórtice es más responsable en la re oxidación que la misma inyección de aire. Entonces, a mayor vórtice mayor nivel de saturación de oxígeno.

El tipo de rotor utilizado en el proceso de desgasificación del aluminio juega un papel importante en el tamaño y dispersión de las burbujas las cuales son las responsables de arrastrar el hidrogeno H_2 hacia la superficie en conjunto con las inclusiones.

Aunque en nuestro caso solo se probó el rotor (liso), se debe hacer un análisis muy profundo sobre el diseño de los rotores.

Capítulo V. Conclusiones

- Se construyó un modelo físico a escala 1:1 de un horno olla industrial para refinación de aluminio de la empresa Cooper Crouse Hinds, cumpliendo los criterios de similitud geométrica y dinámica apropiados.
- Del estudio de la revisión bibliográfica se desprende que para lograr una operación de desgasificado eficiente desde el punto de vista cinético y económico se requiere:
 - Generar una gran área interfacial
 - Lograr una buena distribución de las burbujas en todo el baño
 - Lograr el mayor tiempo de residencia posible, para alcanzar el equilibrio termodinámico entre el gas de purga y el hidrógeno disuelto
 - Generar una turbulencia adecuada
 - Mantener una buena estabilidad superficial durante toda la operación
 - Impedir la formación de vórtices o que su tamaño sea el menor posible
- La caracterización del proceso de re oxidación de agua, basado en el modelo físico desarrollado en este trabajo, nos permitió conocer de manera cualitativa y cuantitativa la influencia de diversas variables de diseño y operación en el proceso de re oxidación del agua. La velocidad de agitación es la variable que afecta más la cinética de re oxidación ya que un incremento en esta variable promueve más convección, mayor turbulencia, burbujas más finas y mejor distribuidas, y en contraparte genera mayores vórtices que a su vez incrementan el nivel de saturación del oxígeno en el agua. El flujo de gas no mejora el mezclado y un aumento en el flujo de aire solo genera más burbujas, pero no más finas ni mejor distribuidas. El efecto de la posición del rotor no es tan importante para la cinética de re oxidación aunque si impacta en el tamaño del vórtice y por ende en el nivel de saturación.

Trabajo futuro

Dentro de las potenciales futuras investigaciones a realizar con el sistema destacan:

- Analizar patrones de flujo, perfiles de velocidad, mapas de vectores y estructura turbulenta mediante la técnica de velocimetría por imagen de partícula (**PIV**).
- Pruebas de mezclado tanto cualitativas como cuantitativas en el caso primero se efectúan mediante el uso de trazadores (tintas, anilina, priolita, azul de metileno, partículas muy finas de aluminio) y las cuantitativas como es el caso de la conductividad eléctrica se realizan por medio de sales y electrodos.
- Pruebas de la cinética de la desoxidación del agua.
- Análisis del efecto de las principales variables de proceso sobre la cinética de desgasificación como son: el diseño del reactor, diseño del rotor, la ubicación del rotor dentro del reactor, velocidad de rotación, flujo de gas, tiempo de inyección, y utilización de mamparas o acondicionadores de flujo como fue en el caso de Yoshikazu Ohno y col^[5].
- Análisis del diseño óptimo del rotor

Índice de figuras		Página
Figura 1.	Piezas automotrices de alta calidad	8
Figura 2.	Efecto del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas del aluminio	10
Figura 3.	Diferentes tipos de porosidades presentes en aluminio	11
Figura 4.	Solubilidad del hidrógeno en función de la temperatura para aluminio puro y algunas aleaciones de aluminio	13
Figura 5.	Resumen de las etapas de remoción de hidrógeno	15
Figura 6.	Niveles de refinación del aluminio mediante diferentes métodos. a) Sin tratamiento, b) Lanza, c) Rotor Inyector, d) Refinación al vacío	18
Figura 7.	Componentes del sistema Rotor-Inyector	19
Figura 8.	Comparación entre el tamaño y distribución de burbujas en el sistema rotor inyector y lanza con modelos físicos de agua	19
Figura 9.	Comparación de las eficiencias de desgasificado de tres técnicas diferentes: lanza, tapón poroso y rotor inyector	26
Figura 10.	Reactor Industrial.	32
Figura 11.	Planos para la fabricación de la base estructural	34
Figura 12.	Etapas en la construcción de la base estructural	35
Figura 13.	a) Chumaceras. b) Placa barrenada donde van sujetas las chumaceras	36
Figura 14.	Anillo posicionador de la altura de la flecha	36
Figura 15.	Tubo de acero inoxidable donde va sujeto el soporte	37
Figura 16.	a) Base tensora del motor. b) Motor	38
Figura 17.	a) Cople de bronce. b) Junta rotativa	39
Figura 18.	a) Cople de acero. b) Cople de acero unido al cople de bronce. c) Cople unido con la polea	39
Figura 19.	Maquinado de la parte media de la flecha rotatoria	40
Figura 20.	a) Flecha de Nylamid. b) Cuerda para la unión del tubo de acero. c) Cuerda para rotor.	41
Figura 21.	a) Fresadora. b) Rotor Maquinado (liso)	42
Figura 22.	Diseño de los rotores	43
Figura 23.	Esquema de ascenso de burbujas de gas en una olla de acero	50
Figura 24.	Diseño del modelo físico	53
Figura 25.	Arreglo experimental: 1. Reactor, 2. Recipiente externo, 3. Motor, 4. Junta rotativa, 5. Flecha de Nylamid, 6. Rotor de Nylamid, 7. Flujómetro, 8.Regulador de presión, 9. Válvula, 10. Oxímetro, 11. Tacómetro.	53
Figura 26.	Instrumentación del reactor: 1. Junta rotativa, 2. Oxímetro, 3. Rotor de Nylamid (liso), 4. Flecha de Nylamid, 5. Compresor, 6. Flujómetro, 7. Motor, 8. Reactor, 9. Recipiente externo del reactor.	54
Figura 27.	Esquema de las dimensiones características del sistema	55

Figura 28.	Oxímetro digital	56
Figura 29.	a) Tacómetro. b) Flujómetro	56
Figura 30.	Efecto de la velocidad de giro del rotor sobre la cinética de re oxidación	59
Figura 31.	Efecto del flujo de gas inyectado sobre la cinética de re oxidación	60
Figura 32.	Efecto de altura del rotor sobre la cinética de re oxidación	61
Figura 33.	Efecto de la velocidad de giro: a) RPM=0 Q=20 l/min h= 16.5cm; b) RPM=294 Q=20 l/min h= 16.5cm; c) RPM=578 Q=20 l/min h=16.5 cm; d) RPM=675 Q=20 l/min h=16.5cm; e) RPM=1000 Q=20 l/min h =16.5 cm.	62
Figura 34.	Efecto del flujo de gas: a) RPM=578 Q=0 l/min h=16.5cm; b) RPM=578 Q=10 l/min h=16.5cm; c) RPM=578 Q=20 l/min h=16.5cm; d) RPM=578 Q=40 l/min h= 16.5cm; e) RPM=578 Q=60 l/min h=16.5cm.	63
Figura 35.	Efecto de la altura del rotor: a) RPM=578 Q=20 l/min h=10.5cm; b) ; c) RPM=578 Q=20 l/min h=22.5cm.	64

Índice de Tablas		página
Tabla 1	Designación para aleaciones trabajadas en frío y de colada	5
Tabla 2	Características de algunas aleaciones de aluminio y sus usos comunes.	6
Tabla 3	Niveles aceptables de hidrógeno disuelto en piezas de aluminio	17
Tabla 4	Lista de materiales y aparatos para la construcción del modelo físico	33
Tabla 5	Dimensiones de reactores.	45
Tabla 6	Propiedades físicas de los materiales	49
Tabla 7	Velocidades de agitación escaladas del reactor al modelo físico	50
Tabla 8	Flujo de gases escalados del reactor al modelo físico	50
Tabla 9	Cálculo de la velocidad de ascenso para diversos flujos de gas	51
Tabla 10	Cálculos de los diámetros de burbuja	52
Tabla 11	Condiciones experimentales para el estudio de cinética de re oxidación	57

Referencias bibliográficas.

- [1] W. Hufnagel. Manual del aluminio. Ed. Reverte. Barcelona España. 1992.
- [2] Pierre Barrand, Robert Badeau, André Dumas. Enciclopedia del aluminio. Vol. 1. Ed. Urmo. 1967. p. 30-128.
- [3] J.E Gruzleski and B.M. Closset (1990). The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys.
- [4] Olusegun J. Ilegbusi, Manabu Iguchi, Walter Wahniedler. Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations. Ed. Chapman and Hall. 2000.
- [5] Yoshikazu Ohno, Duane T. Hampton and Andy W. Moores. The GBF Rotatory System for Total Aluminum Refining. Light metals 1993.
- [6] F. Boeuf, M. Rey and E. Wullloud Alusuisse. Metal Batch Treatment Optimization of Rotor Running Conditions. Light Metals 1993.
- [7] V.S. Warke, S. Shankar, M.M Makhlof. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Molten Aluminum Cleaning by The rotating Impeller degasser. Part II. Removal of Hydrogen Gas and Solid Particles. Elsevier. 2004.
- [8] Mariola Saternus, Jan Botor. The Physical and Mathematical Model of Aluminum refining Process in Reactor Uro-200. TMS (The minerals, Metals and Materials Society).
- [9] David V. Neff. Understanding Aluminum Degassing. Modern Casting; May 2002; 92, 5; ABI/INFORM Trade & Industry. Pg. 24.
- [10] D. Saha. Gas Interactions in Nonferrous Metals Processing. The minerals, Metals & Materials Society, 1996. Pg. 127-143.
- [11] M. Sano, Y. Fujita, and K. Mori, Metall. Trans; 7B, 300-303, 1976.
- [12] Oldshue, J.Y. & N.R. Herbst. A Guide to Fluid Mixing. Ed. Lightnin, Rochester, N. Y. 1990.