



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“Diseño y evaluación de rotores para el desgasificado
de aluminio mediante modelado físico”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

JORGE LUIS GONZÁLEZ NÚÑEZ



Cd. Mx. 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. en M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

VOCAL: Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda

SECRETARIO: M. en I. Claudia Flores Vargas

1er. SUPLENTE: M. en I. Luis Darío Escobar Mejía

2° SUPLENTE: IQM Héctor Israel Quiroga Herrera

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA UNAM

Asesor del tema:

Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda

Sustentante:

Jorge Luis González Núñez

Índice general

1	Introducción.....	7
1.1	Visión general	7
1.2	Justificación.....	9
2	Marco Teórico	11
2.1	Efecto del hidrógeno	11
2.2	Formación de porosidades.....	13
2.3	Fuentes de hidrógeno	15
2.4	Métodos de desgasificación.....	16
2.4.1	Desgasificación con gas de purga	17
2.4.2	Desgasificación al vacío	17
2.4.3	Desgasificación con hexacloroetano.....	18
2.4.4	Desgasificación con rotor impulsor	18
2.4.5	Desgasificación con tapón poroso	19
2.5	Teoría de eliminación de hidrógeno con gas de purga	19
2.6	Agitación	21
2.7	Reactor	22
2.8	Impulsor o propela	23
2.9	Modelos de Flujo.....	25
2.10	Antecedentes	28
2.11	Hipótesis	36
2.12	Objetivos	36
3	Metodología del trabajo.....	37
3.1	Modelo físico.....	37
3.2	Criterios de similitud y números adimensionales	38
3.3	Fabricación y diseño de las propelas.....	42
3.4	Arreglo experimental y descripción del equipo.....	45
3.5	Procedimiento experimental.....	49
3.6	Pruebas Cualitativas	50
3.6.1	Elección de las variables de trabajo.....	50
3.7	Pruebas Cuantitativas	59
3.7.1	Consideraciones experimentales.....	59

3.7.2 Efecto del baffle	60
3.7.3 Diseño experimental	61
4 Resultados y análisis de resultados	62
5 Conclusiones.....	67
Bibliografía	69

Índice de figuras

Número de figura	Descripción	Página
Figura 1	Total de Aluminio primario producido para las diferentes regiones de Enero a Diciembre del 2017 en miles de toneladas.	8
Figura 2	Estándar comparativo para densidad de poros en una aleación de aluminio A356 a 100 mm de presión reducida.	10
Figura 3	Solubilidad de hidrógeno en aluminio a una atmósfera.	12
Figura 4	Nucleación heterogénea de una burbuja de gas en varias interfaces.	14
Figura 5	Efecto del tamaño de burbuja en la eficiencia del desgasificado en aluminio líquido.	21
Figura 6	Reactor tipo Batch.	22
Figura 7	Impulsor de tipo axial.	23

Figura 8	Impulsor de tipo tangencial.	24
Figura 9	Impulsor de tipo marino.	25
Figura 10	Modelo de flujo radial.	26
Figura 11	Modelo de flujo axial.	26
Figura 12	Modelo de flujo tangencial.	27
Figura 13	Dimensiones del reactor Kambara y rotor.	28
Figura 14	(a) Propela XSR con boquillas. (b) Propela clásica de tipo estrella.	29
Figura 15	(a) Pieza desgasificada con el impulsor XSR. (b) Pieza desgasificada con el impulsor tipo estrella.	30
Figura 16	Tres propelas propuestas por los autores.	32
Figura 17	Modelo físico de agua probando los tres diseños de propelas a 536 rpm y flujo de 7 l/min. Método de inyección a través de eje en la parte superior y debajo el método de inyección nuevo.	35
Figura 18	Relación del sistema real con el modelo físico utilizado.	38
Figura 19	Polímero polimórfico: (a) nuevo, (b) después de ser sometido con agua a 60°C, (c) endurecido en agua fría.	43

Figura 20	Propela 1.	44
Figura 21	Propela 2.	44
Figura 22	Propela 3.	45
Figura 23	Arreglo experimental.	46
Figura 24	Oxímetro y electrodo.	47
Figura 25	Tacómetro digital.	47
Figura 26	Flujómetro.	48
Figura 27	Compresor de aire.	48
Figura 28	Baffle de madera, permite eliminar el vórtice del líquido.	61
Figura 29	Curvas de desgasificación experimentales a 450 rpm y 144 NI/min. sb: sin baffle.	62
Figura 30	Dispersión de burbujas de los tres diferentes rotores (a) P#1, (b) P#2 y (c) P#3.	63
Figura 31	Comparación de los vórtices formados en tres diseños propuestos. (a) P#1, (b) P#2 y (c) P#3.	64

Figura 32	Curvas de desgasificación experimentales con el uso de baffle a 450 rpm y 144 NI/min.	65
Figura 33	Comparativa de pruebas realizadas sin baffle en la parte superior y con baffle en la parte inferior (a) P#1, (b) P#2 y (c) P#3.	66

Índice de tablas

Numero de tabla	Descripción	Página
Tabla 1	Dimensiones del reactor tipo Batch y del modelo físico.	40
Tabla 2	Números adimensionales obtenidos para los criterios de similitud.	42
Tabla 3	Combinación de variables en la primera parte de las pruebas preliminares.	52
Tabla 4	Pruebas para determinar velocidad de operación segunda parte de las pruebas preliminares.	57

Introducción

1.1 Visión general

El aluminio es sumamente abundante en la composición de la corteza terrestre, se halla en una proporción aproximada del 15% y sólo la sílice lo supera. Además, es considerado uno de los metales más modernos si lo comparamos con la metalurgia nacida hace más de 5000 años.

En 1825, Christian Oersted preparó una amalgama de aluminio (metal disuelto en mercurio) haciendo reaccionar amalgama de potasio con cloruro de aluminio. Destilando el mercurio fuera del contacto del aire obtuvo un metal de aspecto parecido al estaño; era impuro, pues contenía una ligera proporción de mercurio. Más adelante, en 1827 el químico alemán Wöhler lo obtuvo en forma de polvo y posteriormente determinó por primera vez las propiedades del metal recién descubierto, su densidad y ligereza.

Mediante estas técnicas el costo de producción de aluminio era levado, por lo que, combinado con la baja resistencia mecánica del aluminio puro, limitaba las aplicaciones del metal.

En el año 1886, Paul Louis Héroult, en Francia, y Charles Martin Hall, en Estados Unidos describieron en sus patentes básicas, el proceso que se emplea actualmente para obtener aluminio. La disponibilidad de energía eléctrica más barata en los años que siguieron a la instalación de la primera estación generadora de potencia contribuyó a la explotación industrial del proceso Hall-Héroult.

La creciente cantidad de metal que se obtenía propició el uso del aluminio en aplicaciones como el vaciado de utensilios domésticos, el alambre laminado o estirado para la distribución de la energía eléctrica y las secciones con fines ingenieriles, junto con los productos como hojas laminadas.

El aluminio presenta importantes características que lo hacen un material altamente solicitado en la industria, algunos de estas son una baja densidad (2.70 Kg/m³), bajo punto de fusión (660°C), no magnético, resistente a la corrosión, alta compatibilidad para alearse con otros metales (Mg, Si, Mn, Zn, etc.), un aspecto agradable a la vista y altamente reciclable.

En 1990, la producción total de aluminio fue de alrededor de 28 millones de toneladas con más de 8 millones de toneladas de chatarra reciclada; y hoy el total está cerca de 56 millones de toneladas con cerca de 18 millones de toneladas recicladas. Actualmente alrededor del 50% de la chatarra es considerada chatarra vieja, es decir, chatarra de productos al final de su vida útil [1]. Como se observa en la **Figura 1** la producción mundial de aluminio primario.



Figura 1.-Total de Aluminio primario producido para las diferentes regiones de Enero a Diciembre del 2017 en miles de toneladas [2].

Actualmente, el aluminio sigue compitiendo con otro tipo de materiales que ofrecen costos bajos de producción, pero las compañías de aluminio continúan

innovando para ofrecer a sus clientes un material con mejores propiedades tecnológicas. El reciclado y la manufactura del aluminio exploran nuevos procesos tecnológicos para encaminar la producción hacia costos más bajos.

1.2 Justificación

En el caso del reciclado de aluminio o también llamado proceso de fundición, el metal cambia del estado sólido al estado líquido al alcanzar la temperatura de fusión y, una vez que el metal ha cambiado de fase, se somete a una serie de tratamientos al metal líquido con el fin de obtener un producto de alta calidad.

Estos tratamientos son:

- Desgasificado
- Refinación de grano
- Modificación
- Filtrado

La realización de este trabajo se centra en la etapa de desgasificado de aluminio, en la cual se busca eliminar el hidrógeno disuelto en el metal líquido durante la fusión. Es necesario mencionar que el hidrógeno es altamente soluble en el aluminio líquido a temperaturas elevadas, la misma solubilidad que se ve disminuida a temperatura ambiente, provocando que durante la solidificación el metal tienda a expulsar el hidrógeno, dando como resultado la formación de pequeñas cavidades conocidas como porosidades.

En la **Figura 2** se muestran los patrones estándares comparativos para la aleación de aluminio A356, que se realizan en pruebas a presión reducida, en la cual observamos el efecto del hidrógeno en la formación de estos poros, ya que a

mayor contenido de hidrógeno es más grande el tamaño y la densidad de los defectos formados en la pieza.

Estas porosidades actúan como discontinuidades provocando una reducción en las propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la fatiga, a la tensión y un desgaste en la superficie. En palabras más simples, una pieza porosa tendrá baja calidad y es indeseable como producto en la industria del aluminio.

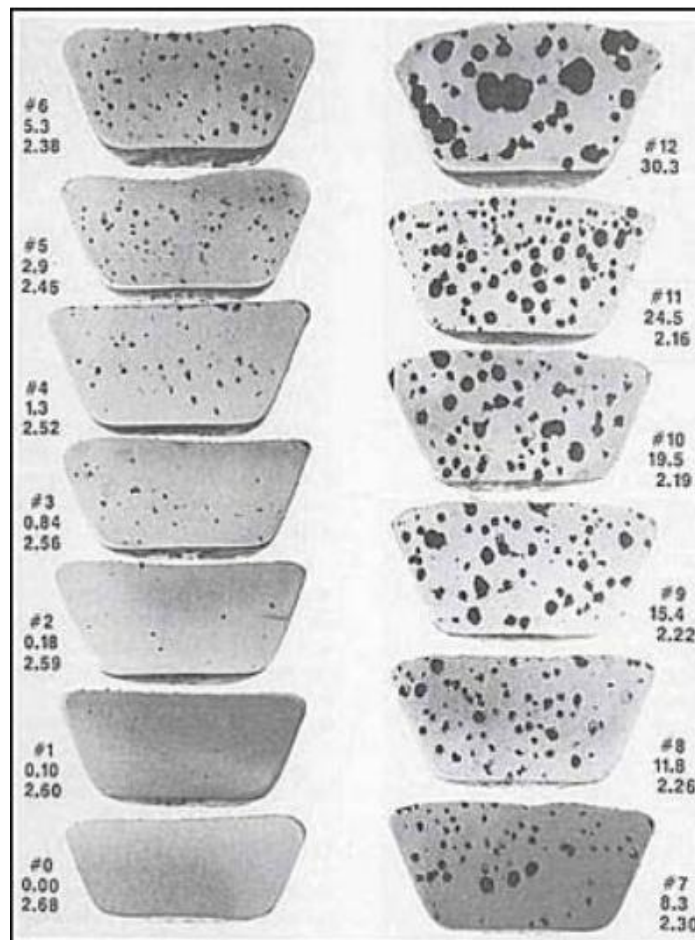


Figura 2.- Estándar comparativo para densidad de poros en una aleación de aluminio A356 a 100 mm de presión reducida [3].

Con el método de desgasificación con rotor inyector se han logrado buenos resultados al inyectar un gas de purga a través de un eje en movimiento que tiene

instalado una propela en la parte inferior, buscando una buena dispersión del gas en el metal líquido. Actualmente, a nivel industrial el costo del gas de purga y la energía eléctrica requerida para hacer funcionar el equipo representan un costo importante que la industria del aluminio tiene que sufragar.

Estudiando a fondo el proceso de desgasificación, con un adecuado diseño de la propela y una acertada combinación de las variables del proceso, como la velocidad de rotación y el flujo de gas, es posible reducir los tiempos de desgasificación y, por consiguiente, los costos de producción.

Realizar pruebas en laboratorio es todo un reto, ya que el utilizar un metal fundido a altas temperaturas representa un riesgo para el personal de laboratorio, además de que al ser el aluminio fundido un líquido no transparente (opaco) es imposible a simple vista estudiar la dispersión de burbujas de gas en el seno del fluido.

Por esta razón es útil la implementación de un modelo físico para facilitar el estudio de este sistema con materiales más convenientes para estudiar la dinámica del fluido, la dispersión del gas y reducir riesgos experimentales.

2 Marco Teórico

2.1 Efecto del hidrógeno

El hidrógeno es el único gas que presenta una solubilidad apreciable en el aluminio líquido, por esta razón el aluminio y sus aleaciones tienden a absorber hidrógeno durante el proceso de fundición. La solubilidad del hidrógeno en aluminio aumenta drásticamente a altas temperaturas, como se puede apreciar en la **Figura 3**.

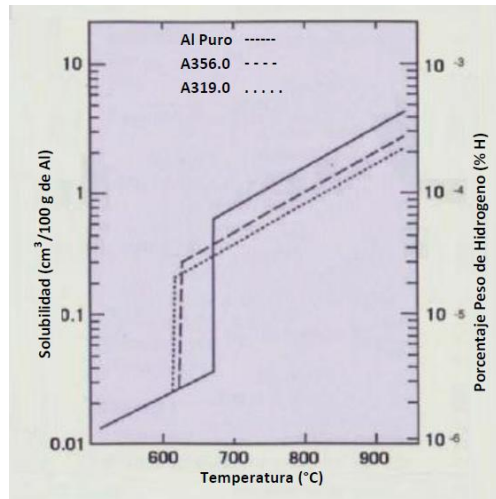


Figura 3.- Solubilidad de hidrógeno en aluminio a una atmosfera [4].

La solubilidad del aluminio puro en estado líquido y sólido es de 0.69 y 0.04 ppm respectivamente, valores que varían ligeramente de una aleación a otra. La presencia de algunos elementos en las aleaciones de aluminio pueden afectar la solubilidad del hidrógeno, por ejemplo, el incremento de elementos como el silicio y el cobre provocan un decaimiento en la solubilidad del hidrógeno. Por otra parte, el magnesio y el litio tienden a incrementar la solubilidad del hidrógeno.

Distintas aleaciones de aluminio presentan diferentes valores de sensibilidad a la disolución de hidrógeno y, por consiguiente, densidad de poros, si el hidrógeno no es removido completamente.

Durante el enfriamiento y la solidificación el hidrógeno disuelto en exceso comienza precipitar en su forma molecular, posteriormente sale expulsado de la matriz metálica formando las porosidades; dichas porosidades se pueden clasificar como primarias o secundarias. Las porosidades primarias, también llamadas interdendríticas, se forman cuando las cantidades de hidrógeno son demasiado grandes generando una saturación crítica en el líquido que expulsa al gas durante la solidificación en forma de burbujas. Por otra parte, las porosidades secundarias se dan a bajos niveles de hidrógeno o subcríticos.

Estas pequeñas burbujas de hidrógeno presentan una alta estabilidad a causa de las fuerzas de tensión superficial, la difusión que se ve afectada durante el enfriamiento del líquido y la ausencia de sitios de nucleación para la precipitación de hidrógeno.

“La precipitación de hidrógeno obedece las leyes de nucleación y es similar a la formación de otras fases metalúrgicas durante la solidificación” [5].

El mecanismo de nucleación de hidrógeno consta de las siguientes etapas:

1. El transporte difusivo de los átomos de hidrógeno en el baño del metal líquido.
2. La formación de núcleos subcríticos como una función del tiempo y del enfriamiento.
3. De forma aleatoria ocurre la aparición de precipitados que al superar el tamaño crítico se vuelven estables para continuar creciendo.
4. Un aumento en el volumen de la burbuja como consecuencia de la difusión de átomos libres de hidrógeno hacia el interior de la misma.

Este tipo de defectos no deben ser confundidos con las cavidades formadas a consecuencia de la contracción, fenómeno que ocurre por una diferencia volumétrica entre el estado líquido y el sólido durante la solidificación en los metales. Las cavidades por contracción pueden ser eliminadas exitosamente con un sistema de alimentación bien diseñado.

2.2 Formación de porosidades

En los últimos años se han propuesto diferentes mecanismos para la formación de porosidades, una de las más aceptadas por la mayoría de los autores nos explica que estos poros se forman por la nucleación en superficies externas al baño metálico, como pueden ser inclusiones con baja mojabilidad, las paredes del molde, grietas, la presencia de ciertos óxidos e incluso la interface sólido/líquido que avanza durante la solidificación, siendo más favorable la nucleación en

interfaces dendríticas o celulares debido a las ranuras y surcos que provocan una concentración local alta de gas, como se muestra en la **Figura 4**.

A continuación, se enlistan las diferentes etapas del mecanismo de formación de porosidades:

Primera etapa: En esta primera parte ocurre un incremento constante de hidrógeno en el líquido interdendrítico a causa del incremento de la fracción del sólido que expulsa al gas a través de la interface sólido/líquido. La cantidad de hidrógeno en el líquido continuará aumentando hasta exceder el límite de solubilidad. En este momento el poro podría nuclear, pero requiere superar una barrera energética de superficie; por esta razón, la cantidad de hidrógeno en el líquido seguirá aumentando por arriba del límite de solubilidad.

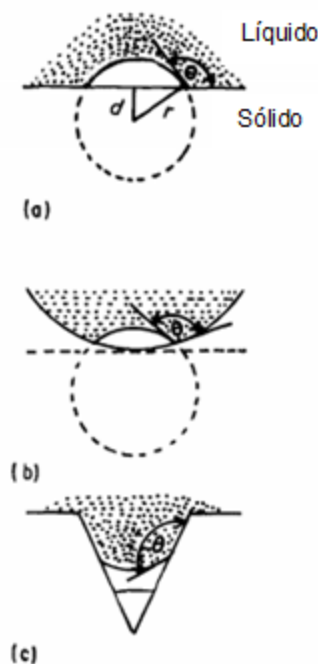


Figura 4.- Nucleación heterogénea de una burbuja de gas en varias interfaces: (a) Nucleación en una superficie plana, (b) nucleación en un sustrato cóncavo, (c) forma extrema de (b) ^[6].

Segunda etapa: Posteriormente ocurre la nucleación en las dendritas o en algún otro sitio de heterogeneidad, como ya se comentó anteriormente. El poro continuará creciendo hasta que su radio exceda el tamaño crítico para la estabilidad mecánica y entonces la burbuja se expande de manera inestable y crítica, se separa y flota, pudiendo ser libremente transportada por el líquido.

Tercera etapa: Una vez liberada la burbuja continúa un crecimiento acelerado y, por esta razón, el contenido de hidrógeno en la zona desciende rápidamente.

Cuarta etapa: La concentración de hidrógeno en el líquido disminuye a consecuencia del crecimiento del poro y este continuará aumentando su tamaño a una velocidad menor hasta que la fase líquida haya solidificado por completo. La concentración de hidrógeno a la cual comienza a nuclear el poro es un valor crítico, sin embargo, depende en mayor medida de la velocidad de enfriamiento ya que los poros van a nuclear predominantemente en las dendritas.

Cabe mencionar que en bajas extracciones de calor (velocidades de enfriamiento lentas) los poros evolucionan hasta tamaños grandes, mientras que a altas velocidades de extracción de calor los poros son pequeños y en gran cantidad. La densidad y tamaño de estos poros también depende del contenido inicial de hidrógeno y del proceso de fabricación.

2.3 Fuentes de hidrógeno

Existen varias posibles fuentes de hidrógeno durante la fundición de aluminio, como pueden ser:

- El horno.- Los hornos que funcionan quemando combustible, que en ocasiones son usados en la fundición, pueden llegar a generar hidrógeno a causa de una incompleta combustión del combustible o del gas natural.
- Carga.- Materiales que son cargados al horno como pueden ser chatarra, lingotes, retornos, etc., pueden llegar a contener productos de corrosión, arena, lubricantes o grasa. Estos contaminantes son posibles fuentes de hidrógeno por contener humedad o por la reducción de compuestos orgánicos.
- Sales.- Muchas de las sales utilizadas durante el tratamiento al metal líquido son higroscópicas, por lo que recogen pequeñas cantidades de agua que posteriormente al descomponerse generan hidrógeno.
- Herramientales y componentes externos.- Herramientas utilizadas durante el proceso de fusión pueden adicionar cantidades de agua al metal líquido si no se encuentran limpias y secas, además de cementos y refractarios que no estén completamente sellados y curados.
- Reacciones entre el metal y el molde.- Si durante el vaciado el flujo de metal es excesivamente turbulento, se puede incorporar aire al molde de manera indirecta. Si este aire no es expulsado del molde antes de la solidificación puede resultar en una fuente importante de hidrógeno. Una excesiva humedad en la arena con la técnica de moldeo en verde provee de agua, que posteriormente a la temperatura del metal líquido se descompondrá adicionando hidrógeno al sistema.
- Atmósfera.- La humedad natural que contiene la atmósfera de trabajo provee de hidrogeno al aluminio líquido durante la fusión ^[3].

2.4 Métodos de desgasificación

Existen diferentes métodos que pueden ser utilizados para la eliminación de hidrógeno en el metal fundido. El método más simple sería el de mantener el metal líquido a una temperatura relativamente baja, de tal forma que ocurra una

desgasificación natural a consecuencia de la disminución de la solubilidad del hidrógeno; esto claro, antes de que el metal comience a solidificar, lo cual no es siempre posible, por lo que se tiene la necesidad de encontrar otras vías alternas para desgasificar el aluminio.

2.4.1 Desgasificación con gas de purga

El método consiste en inyectar un gas de purga o una mezcla de gases bajo presión a través de una lanza o un tubo. Este gas de purga colecta el hidrógeno a causa de la baja presión parcial proporcionado por la burbuja con respecto al metal que se encuentra a su alrededor. El hidrógeno difunde hacia el interior de la burbuja de gas de purga que se eleva hacia la superficie donde, finalmente se expulsa e hidrógeno a la superficie.

Los gases de purga pueden ser inertes, como el argón y el nitrógeno, o también pueden ser reactivos como el cloro o el freón 12. Los gases reactivos son usados en concentraciones bajas por debajo del 10% y se adicionan junto con gases inertes. Los gases reactivos se someten a una reacción química. El gas cloruro reacciona con el aluminio líquido para formar $AlClO_3$ que se utiliza como gas de purga. En el caso del freón y el flúor, el reactivo AlF_3 forma una fase sólida. Tanto el cloro como el flúor tienen un efecto favorable sobre la tensión superficial de la burbuja. A pesar de que el cloro es muy efectivo como gas de purga, también es dañino y tóxico, por lo que normalmente se utilizan gases inertes.

2.4.2 Desgasificación al vacío

No es usado actualmente por ninguna empresa en América, pero es usado en Europa para fabricar diversas aleaciones de aluminio, aplicando un flujo de argón durante 30 minutos a una presión de 7 Pa, donde se han encontrado una reducción importante en el contenido de hidrógeno disuelto. Una de las ventajas de esta técnica es la mínima cantidad de escoria que se forma durante el proceso.

2.4.3 Desgasificación con hexacloroetano

Uno de los métodos más comunes para desgasificar en la industria de la fundición son las tabletas de hexacloroetano. Estas tabletas se descomponen en el aluminio líquido formando AlCl_3 gaseoso, cuando estas burbujas formadas ascienden hacia la superficie colectan el hidrógeno en el metal líquido y lo expulsan fuera del aluminio. Para que sea más efectivo este método, las tabletas se deben mantener secas y ser sumergidas con ayuda de un herramental hasta la parte más profunda del reactor, donde se mantienen hasta que las tabletas se disuelven por completo. De no ser así, la tableta puede flotar en el metal líquido provocando una baja o nula desgasificación del sistema.

2.4.4 Desgasificación con rotor impulsor

Aunque el uso de gas de purga adicionado mediante lanzas es razonablemente efectivo, no son completamente eficientes. La eficiencia del desgasificado depende del tamaño de la burbuja generando una mayor área de contacto entre el metal líquido y la burbuja. Durante este proceso se genera un mezclado muy pobre, que es más notable en tanques o reactores de gran tamaño. Ante esta problemática, se realizó una mejora añadiendo un sistema rotatorio que ayuda a mezclar el metal líquido.

El principio del sistema rotor impulsor se basa en la inyección del gas de purga a través del eje principal del rotor y hasta la propela, donde son lanzadas las burbujas de gas por unas pequeñas aberturas o ventanas ubicadas en el impulsor. Cuando las velocidades de rotación se encuentran entre 300 y 500 rpm se produce una dispersión de burbujas muy finas a causa de los esfuerzos de corte provocados por el rotor. Este aumento en el área de contacto interfacial incrementa la cinética de desgasificación, resultando en una desgasificación más eficiente.

La cantidad de hidrógeno removido depende del flujo de gas de purga que es inyectado y de la cantidad de hidrógeno inicial en el sistema, así también como de la capacidad de mezclado y los tiempos de residencia de las burbujas. Cada uno de estos factores están relacionados entre sí, existen combinaciones óptimas que logran la mayor eficiencia de desgasificado sin generar una turbulencia excesiva en el sistema.

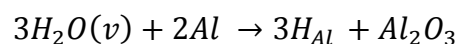
Actualmente, los sistemas comerciales de desgasificación rotatorios pueden lograr contenidos finales de hidrógeno de 0.15 ml/100g.

2.4.5 Desgasificación con tapón poroso

Otro método que es utilizado para generar pequeñas burbujas es el uso de un tapón poroso en la punta de la lanza de gas. Estos tapones porosos pueden ser fabricados con grafito o con materiales cerámicos donde se logra una porosidad muy fina. Esta fina porosidad permite la generación de burbujas muy finas comparables con las obtenidas en el método de desgasificación con rotor impulsor. Este método también es más barato que el rotor impulsor en el que las propelas, normalmente fabricadas en grafito, requieren un remplazamiento periódico a causa de la erosión a la que están sometidas por el contacto con el metal líquido.

2.5 Teoría de eliminación de hidrógeno con gas de purga

De todas las posibles fuentes de hidrógeno mencionadas anteriormente la más importante es la humedad en la atmósfera que reacciona con el aluminio líquido mediante la siguiente reacción:



Dado que la solubilidad del hidrógeno es significativamente mayor en el estado líquido en comparación con el estado sólido, existirá un enriquecimiento del líquido durante la solidificación, si se supone que no hay difusión sólida y que ocurre una difusión completa en el líquido durante la fundición, al final de la solidificación habrá un gran incremento de concentración de hidrógeno en la pieza.

En ocasiones, el contenido de hidrógeno está por debajo de la solubilidad del aluminio líquido, pero durante la solidificación la concentración en el líquido aumentará y el límite de solubilidad será excedido y, como consecuencia, tendremos una pieza porosa.

Varios factores termodinámicos y cinéticos controlan la desgasificación de hidrógeno del aluminio líquido. La remoción de gas se facilita a bajas temperaturas y altas concentraciones. El hidrógeno es removido por:

- Transporte de hidrógeno en la fundición hacia la vecindad de la burbuja de gas inerte por convección y difusión.
- Transporte difusivo a través de una delgada capa que rodea la burbuja.
- Adsorción química seguida de una subsecuente desorción desde la superficie de la burbuja.
- Difusión de hidrógeno gaseoso dentro de la burbuja.
- Escape del hidrógeno de la superficie de la fundición.

Por lo mencionado en los puntos anteriores, la eliminación de hidrógeno dependerá de los coeficientes de transferencia de masa. También se ha encontrado que la eficiencia del desgasificado depende del tamaño de las burbujas^[7], como se puede observar en la **Figura 5**.

El uso de un impulsor con muescas y aberturas mejora el proceso, dispersando mayormente las burbujas.

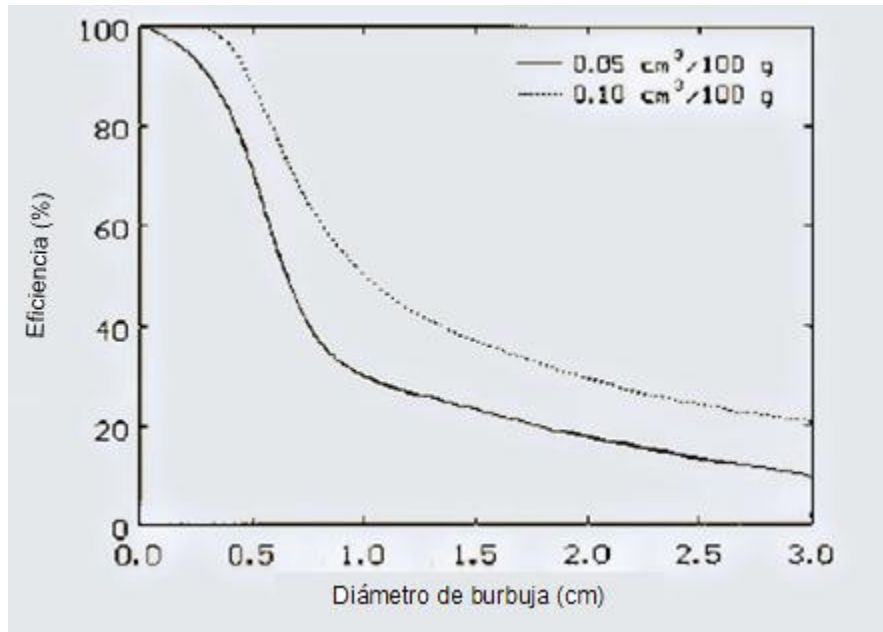


Figura 5.- Efecto del tamaño de burbuja en la eficiencia del desgasificado en aluminio líquido [4].

2.6 Agitación

La agitación durante los procesos de tratamiento al metal líquido juega un papel de suma importancia, más específicamente refiriéndonos al desgasificado, una buena agitación ayuda a la dispersión de las burbujas de gas en el metal líquido por convección y acelera los procesos de transferencia de masa.

Idealmente se busca una desgasificación homogénea en todo el sistema evitando zonas muertas. Estas zonas mantienen disuelto remanentes de hidrógeno provocando, una vez que ha solidificado el metal, porosidades que disminuyen considerablemente la calidad de la pieza.

La tarea principal del impulsor es transferir la energía cinética al metal líquido provocando su movimiento durante la desgasificación, por lo tanto, un buen diseño del rotor es de vital importancia para una eficiente desgasificación.

2.7 Reactor

En la desgasificación del aluminio son altamente utilizados los reactores de tanque agitado, también conocidos como reactores tipo Batch, como se observa en la **Figura 6**; este tipo de tanques son llenados o recargados al inicio con los elementos que se desea mezclar, pero durante el proceso no presentan entrada ni salida de material.

Los reactores tipo Batch están diseñados con un rotor que provoca una agitación y un mezclado en el fluido, muchas veces a través del rotor se inyecta el gas de purga que ayudará a eliminar el hidrógeno en el metal líquido.

El rotor se encuentra montado sobre un eje movido por un motor y el arreglo es de forma axial, generalmente montado en la parte central del tanque.



Figura 6.- Reactor tipo Batch.

2.8 Impulsor o propela

El ancho del impulsor normalmente comprende entre el 30 y el 50 % del diámetro interior del tanque y la anchura de la hoja va de 1/6 a 1/10 de su longitud. Las hojas pueden ser rectas o tener cierta curvatura, inclinadas o verticales. El impulsor se puede diseñar abierto, semi-cerrado o cerrado.

Existen diferentes tipos de impulsores, pero normalmente se encuentran clasificados de acuerdo al tipo de flujo provocado; las tres clasificaciones más comunes son:

- Impulsor axial.- Estos permiten un flujo que se desprende de las palas del impulsor aproximadamente a 45° y esto provoca la recirculación en el tanque, posteriormente el flujo retorna a la parte central del rotor creando un campo de flujo de ida y vuelta paralelo al eje de giro ^[8]. Este tipo de rotor se observa en la **Figura 7**.

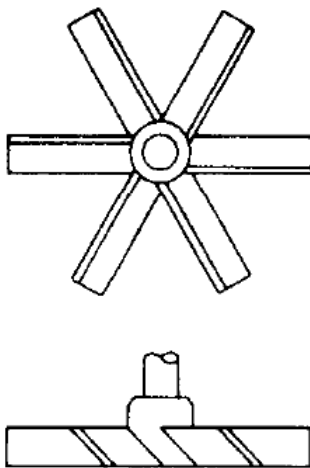


Figura 7.- Impulsor de tipo axial ^[9].

- Impulsor tangencial.- Los más representativos son los rotores de hojas o aspas planas. Estas aspas son paralelas al eje del motor. Los impulsores de aspas múltiples son llamadas turbinas. Los rotores que trabajan a revoluciones más bajas, con dos o cuatro aspas, producen un flujo radial para cualquier Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial, aunque baja capacidad de impulsión ^[8]. Este tipo de impulsor tangencial se observa en la **Figura 8**.

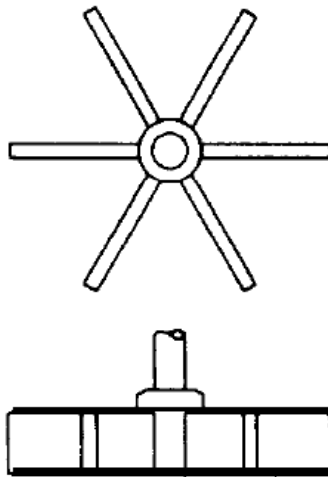


Figura 8.-Impulsor de tipo tangencial ^[9].

- Impulsor de tipo marino.- En este tipo de agitadores se incluyen los de tipo helicoidal. Su principal característica es que trabajan muy cercanos a la pared del estanque y son particularmente eficaces para fluidos de alta viscosidad ^[8]. El impulsor tipo marino se observa en la **Figura 9**.

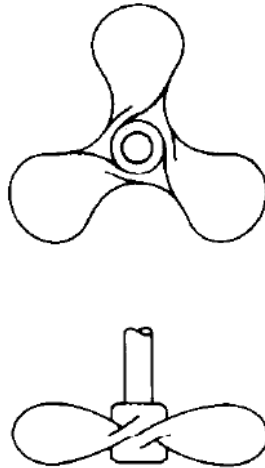


Figura 9.- Impulsor de tipo marino ^[9].

2.9 Modelos de Flujo

El comportamiento del fluido durante el proceso de desgasificación depende de factores como las características del fluido, el tamaño y forma del tanque, la velocidad de rotación y el diseño del impulsor que se encargara de transferir el movimiento al fluido.

La velocidad del fluido en cualquier punto del estanque tiene tres componentes y el modelo de flujo que predomine durante el proceso de desgasificación va a depender de las variaciones del movimiento y de la velocidad de estas.

Las componentes son:

- **Componente radial.-** La componente o velocidad radial está caracterizada por actuar en dirección perpendicular al eje del rotor, como se observa en la **Figura 10.**

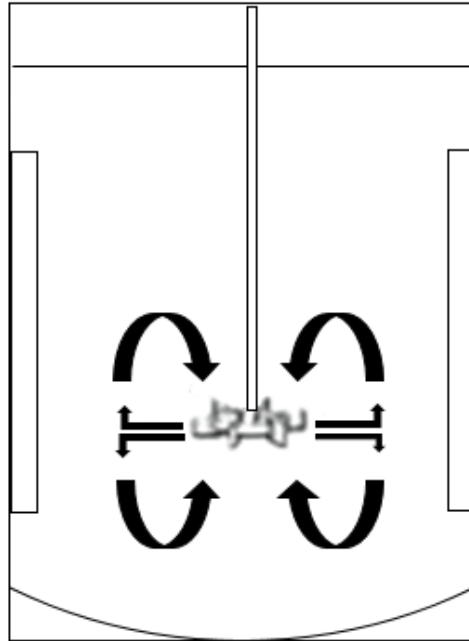


Figura 10.- Modelo de flujo radial.

Componente axial.- La segunda componente llamada axial o longitudinal actúa en dirección paralela al eje del rotor, como se observa en la **Figura11**.

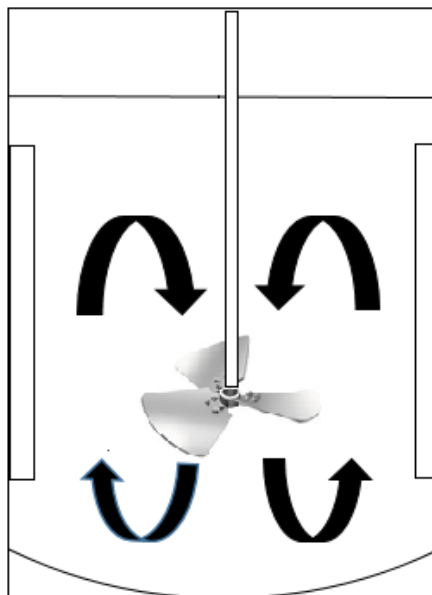


Figura 11.- Modelo de flujo axial.

- Componente tangencial. Esta componente se identifica por tener una dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el impulsor, como se observa en la **Figura 12**.

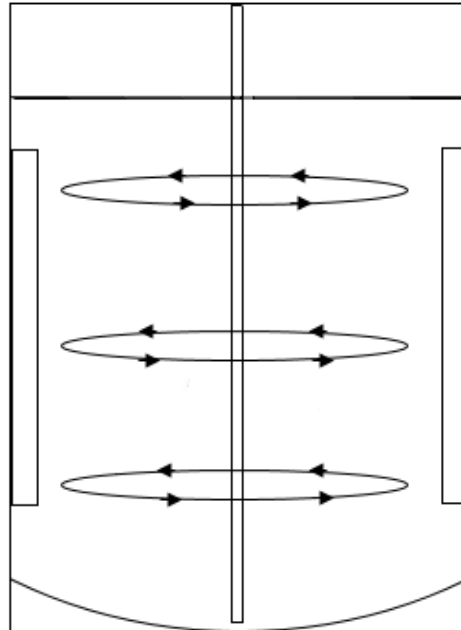


Figura 12.- Modelo de flujo tangencial.

Para la reacción entre el gas de purga y el metal líquido se requiere la máxima área de contacto entre las dos fases, lo cual se logra con burbujas pequeñas que se consiguen formar, fundamentalmente, con un nivel de agitación intenso.

Para el diseño del rotor es importante tomar en cuenta que el elemento estará trabajando a altas velocidades de rotación para provocar una eficiente dispersión del gas en el líquido.

A velocidades grandes de rotación el vórtice aumenta, las burbujas son más pequeñas y son mayormente dispersadas en el fluido.

2.10 Antecedentes

En el artículo llamado “Simulación numérica de la tecnología de purificación por agitación para fundición de aluminio” (Numerical simulation of stirring purifying technology for aluminum melt) ^[10] escrito por Bingbing Wan y colaboradores, los autores investigan el efecto de las variables en un proceso de mezclado y purificado de aluminio con un reactor Kambara. En la **Figura 13** se muestran las dimensiones del reactor Kambara.

Las variables de interés en el trabajo de investigación son la geometría de la propela, la profundidad de inmersión de la propela y la velocidad de rotación.

Los investigadores realizan una simulación computacional con el software ANSYS fluent 14.0 con un modelo de turbulencia k-epsilon, para posteriormente validar la simulación con una serie de experimentos utilizando un modelo físico de capacidad de 600kg que trabaja a 740°C para refinar y mezclar aluminio. Posteriormente, los autores vaciaron probetas para el análisis metalográfico y las pruebas mecánicas.

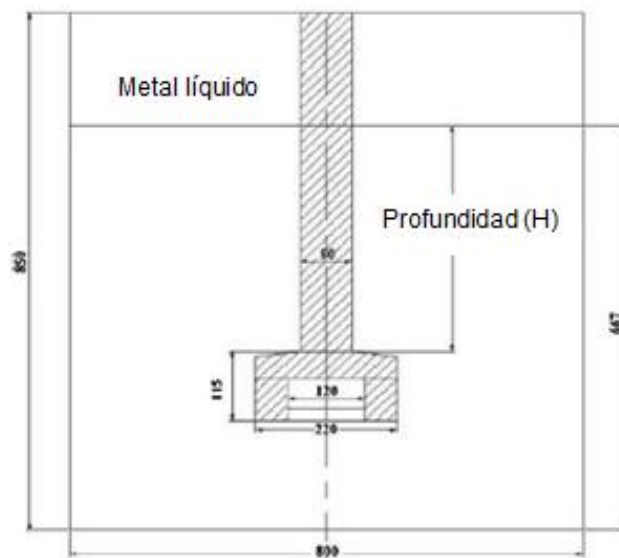


Figura 13.- Dimensiones del reactor Kambara y rotor ^[10].

La comparación de los dos diferentes rotores, uno llamado impulsor XSR, el cual presenta boquillas en el centro; y el segundo, un impulsor de tipo estrella para el mezclado de aluminio fundido, se puede observar en la **Figura 14**.

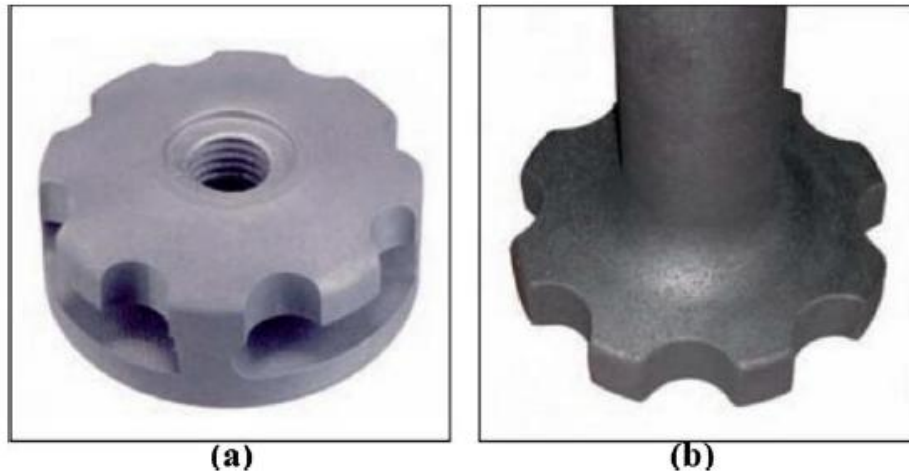


Figura 14.- (a) Propela XSR con boquillas (b) Propela clásica de tipo estrella^[10].

Los dos impulsores se simularon a una profundidad de 315mm y 430 rpm, en donde se concluye que la propela XSR presenta una mayor eficiencia de mezclado a causa del efecto de bombeo y las boquillas ayudan a distribuir uniformemente las burbujas de gas inerte; en comparación, el impulsor de estrella no da una buena eficiencia de mezclado, dejando un volumen grande de metal sin ser tratado en el fondo del reactor.

En otra parte de la experimentación los autores realizan la simulación de la propela XSR a tres profundidades diferentes: 180mm, 315mm y 435mm. La simulación arrojó que a 180mm de profundidad es mayor la distancia entre la propela y el fondo del tanque, lo que provoca circuitos de recirculación más largos con tiempos más lentos.

A 315mm de profundidad los flujos de recirculación se desplazan hacia abajo moviendo un volumen mayor de metal y promoviendo un mezclado uniforme. Al

al aumentar la profundidad a 435mm se crean regiones en la parte superficial cercanas al eje del rotor que no participan en los flujos de recirculación, provocando que se formen zonas muertas.

Para conocer el efecto de la velocidad de rotación, los autores simulan la propela XSR con la profundidad óptima de 315mm a cuatro velocidades de rotación: 390rpm, 430rpm, 480rpm y 550rpm, con la cual determinan que al aumentar la velocidad de rotación aumenta también la velocidad del fluido que ayuda al transporte difusivo en el aluminio líquido, además de aumentar la energía cinética turbulenta y la capacidad de mezclado. Con esto concluyen los investigadores que la velocidad óptima para el proceso es la mayor, que corresponde a 550rpm.

El análisis metalográfico llevado a cabo con el programa Imagen-pro Plus indica que las muestras mezcladas con el impulsor XSR presentan una fracción menor de inclusiones con respecto al impulsor de estrella de 0.07% y 0.5% respectivamente, como se muestra en la **Figura 15**.

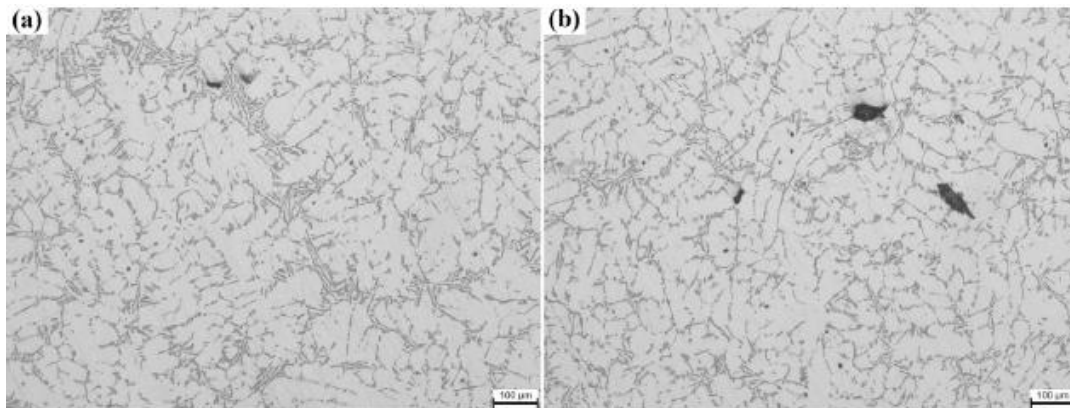


Figura 15.- (a) Pieza desgasificada con el impulsor XSR (b) Pieza desgasificada con el impulsor tipo estrella ^[10].

Para la profundidad de inmersión de 180mm, 315mm y 435mm, el análisis metalográfico calculó fracciones de área con inclusiones de 0.3%, 0.07% y 0.2% respectivamente.

Respecto de la velocidad de rotación, la velocidad óptima de 550 rpm tuvo una fracción de área menor con inclusiones con respecto a las otras velocidades, 430 rpm con 0.07%, 480 rpm con 0.04%, y 550 rpm 0.02%; y la tendencia indica que a mayores velocidades de rotación menor cantidad de inclusiones remanentes en la pieza purificada.

En otro artículo, “Diseño novedoso de desgasificación para aluminio utilizando rotor impulsor en un modelo físico de agua” (Novel degasification design for Aluminum using an impeller degasification water physical model) [11], escrito por Marco A. Ramírez Argáez y colaboradores, los autores proponen el uso de un modelo físico de agua equipado con un eje rotatorio para poder observar el comportamiento del flujo y realizar mediciones constantes de oxígeno en agua; en esta situación, la desoxidación del agua simula la desgasificación del hidrógeno en aluminio.

La cinética de desgasificación comúnmente se expresa como una exponente de decaimiento de primer orden de acuerdo a la ecuación:

$$[%G] = [%G]_0^{-\alpha t} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $[%G]$ es la concentración de gas disuelto en el líquido, α es el coeficiente de transferencia de masa global (s^{-1}), $[%G]_0$ es la concentración de gas inicial y t es el tiempo de tratamiento.

El modelo físico consta de un tanque cilíndrico fabricado con acrílico transparente de 32cm de diámetro y 45cm de altura que es llenado con 30 litros de agua. El tanque cilíndrico, a su vez, se encuentra dentro de un tanque cúbico de acrílico.

En dicho modelo se realizaron las pruebas con tres diferentes propelas fabricadas en Nylamid® y fueron llamadas propela A, B y C respectivamente, como se observa en la **Figura 16**.

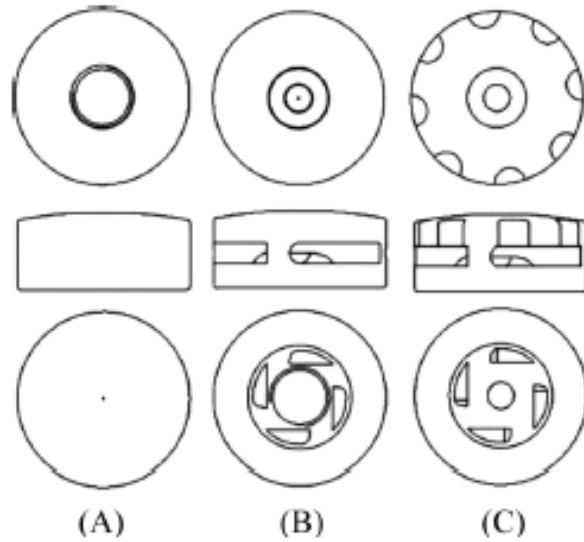


Figura 16.- Tres propelas propuestas por los autores ^[11].

La propela “A” es una propela sólida de superficie lisa; la propela “B” es una propela hueca con boquillas laterales y una perforación en la parte inferior; y por último, la propela “C” es igualmente hueca con boquillas laterales, pero presenta muescas en una de las superficies perpendiculares al eje rotatorio.

Durante la experimentación, los investigadores utilizan un sensor para conocer la concentración de oxígeno en el agua, realizando la medición en la parte superior del tanque donde se asume que el contenido de oxígeno es homogéneo a causa del tamaño pequeño del tanque. También se inyecta nitrógeno gaseoso como gas de purga de dos maneras diferentes, la primera de forma tradicional a través del eje del rotor y la segunda con una lanza desde la parte inferior del tanque, justo por debajo de la propela.

Cada uno de los diseños propuestos fue probado a dos velocidades de revolución diferentes (N) y, a su vez, a dos flujos de gas de purga distintos (Q). Las velocidades de rotación fueron 536 rpm y 800 rpm, y los flujos de 3 l/min y 7 l/min.

Los autores calcularon, con la ecuación siguiente, la cantidad de oxígeno eliminado por unidad de volumen de nitrógeno utilizado para remover el 90% de oxígeno inicial en el modelo:

$$e = \frac{[O]_0 - [O]_f}{V_{N_2}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde $[O]_0$ es el contenido inicial de oxígeno en el líquido y $[O]_f$ es la concentración de oxígeno disuelto después del proceso de desgasificado, con una relación entre $[O_2]_f/[O_2]_0$ que va desde 1 hasta 0.1, y V_{N_2} es el volumen de nitrógeno requerido durante el proceso.

El cambio en la eficiencia de desgasificado de la forma tradicional de inyección de gas con respecto a la forma nueva propuesta por los autores se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta e = \frac{e_u - e_c}{e_c} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Por último, el cambio en el coeficiente global de transferencia de masa de la forma tradicional de inyectar el gas al nuevo punto de inyección, se calculó con la siguiente ecuación:

$$\Delta a = \frac{\alpha_u - \alpha_c}{\alpha_c} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Para la propela tipo A ensayada a 800 rpm no se observa una diferencia significativa en la cinética de desgasificación del método convencional de inyección de gas con respecto al método nuevo, para los dos flujos utilizados.

A 536 rpm utilizando las propelas tipo B y C y los dos flujos de gas de purga, la eficiencia de desgasificación aumenta utilizando la forma nueva de inyección de gas en comparación con la convencional a través del eje. Aparentemente la combinación del diseño de las propelas y la manera en que se inyecta el gas desde la parte inferior incrementa el coeficiente global de transferencia de masa del oxígeno.

El diseño de las propelas B y C provoca un efecto de bombeo, para el caso de la inyección de gas de forma nueva, que succiona al líquido desde la parte profunda del tanque y lo expulsa a través de las boquillas laterales con un momento radial, promoviendo una mayor turbulencia en el tanque en comparación con la propela tipo A que no presenta boquillas, y por lo tanto, no genera este efecto de bombeo. Para el caso de la inyección de gas a través del eje, el efecto de bombeo se ve reducido como consecuencia de que el gas de purga y el líquido que sube por bombeo presentan direcciones opuestas.

Los autores también se dieron cuenta que, al aumentar la velocidad de rotación, el flujo de gas inyectado y la geometría de la propela, los valores del coeficiente global de transferencia de masa aumentan y también la eficiencia de desgasificado, a consecuencia de un mayor flujo turbulento provocado dentro del tanque.

La mayor mejora en la cinética de desgasificación comparando el método de inyección nuevo y el método de inyección convencional a través del eje fue a 536 rpm y un flujo 7 l/min con un $\Delta\alpha$ del 45.5% para la propela C y de 32.8% para la propela tipo B. En cuanto a lo que se refiere a la eficiencia de consumo de gas, a las mismas condiciones mencionadas anteriormente, los investigadores obtuvieron un $\Delta\alpha$ de 47% para la propela tipo C y un $\Delta\alpha$ de 44.4% para la propela B. En la **Figura 17** se observan los tres diseños de propelas con el modelo físico.

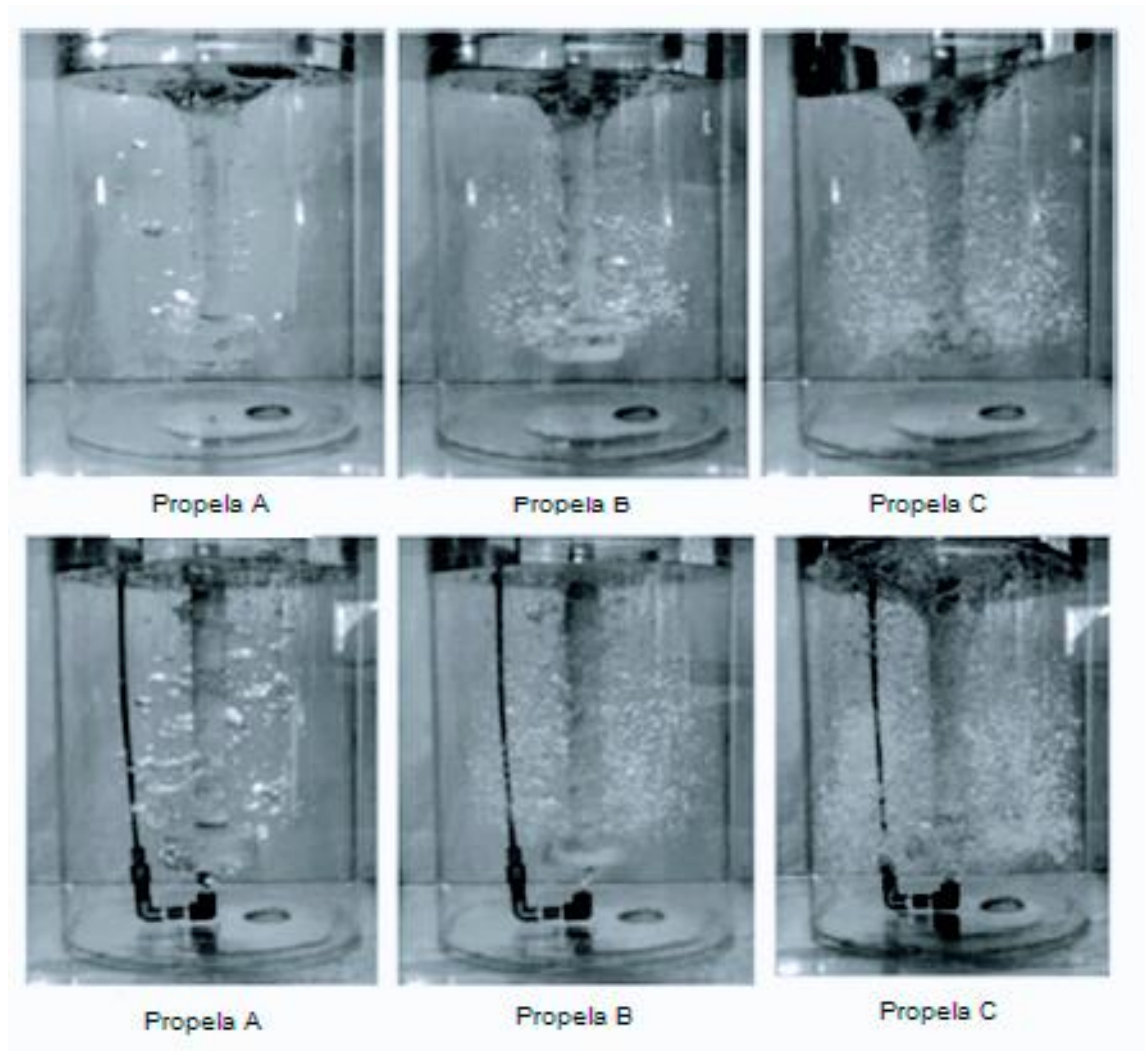


Figura 17.- Modelo físico de agua probando los tres diseños de propelas a 536 rpm y flujo de 7 l/min. Método de inyección a través de eje en la parte superior y debajo el método de inyección nuevo ^[11].

La formación de un vórtice durante la desgasificación, así como la distribución de burbujas en el tanque, fueron evaluadas cualitativamente por observación directa. Los autores concluyeron que el nuevo método de inyección de gas reduce la formación de gas y mejora la distribución de las burbujas en comparación con el método convencional.

2.11 Hipótesis

- Manteniendo constantes condiciones de flujo de gas de purga y velocidad de rotación, los tiempos de desgasificación total tendrán una variación dependiendo del rotor que se esté utilizado.
- Si se introduce un baffle al modelo físico durante la desgasificación, el efecto del vórtice será disminuido y, por consiguiente, los tiempos de desoxigenación total del sistema decrecerán considerablemente en comparación con los experimentos realizados en ausencia del deflector.

2.12 Objetivos

- Fabricar tres diferentes diseños de rotores basados en la bibliografía, probar dichos rotores en un modelo físico de un tanque tipo Batch y elegir el diseño que presente un mejor desempeño para desoxigenar totalmente el sistema en un tiempo más corto.
- Con la ayuda de un modelo físico es posible realizar un análisis visual para elegir de manera cualitativa las variables más adecuadas para realizar pruebas de desgasificación con un rotor inyector.
- Realizar una comparación de los tiempos de desgasificación con rotor inyector en un modelo físico con la instalación de un baffle y la ausencia de este.

3 Metodología del trabajo

3.1 Modelo físico

Un modelo físico es una representación a escala de una estructura, una máquina o un sistema fabricados con el fin de estudiar su comportamiento. Con esta herramienta se busca mejorar un diseño o perfeccionar un sistema. Comúnmente, los modelos físicos se fabrican en un tamaño más pequeño en comparación con el elemento real, sin embargo, existen casos en los que se requiere que el modelo sea superior en tamaño.

Los modelos se pueden fabricar de materiales diversos como plástico, madera, metal y hasta cemento u hormigón; cuando se realizan ensayos con fluidos, el agua y el aire son los elementos que normalmente se utilizan, aunque tienen que cumplir con ciertos criterios para poder ser comparables con el fluido real.

En este caso en concreto en el cual se modela un tanque tipo Batch el cual contiene aluminio fundido y que se encuentra siendo agitado por un rotor, el modelo físico con agua no solamente abarata los costos energéticos que se requerirían para fundir el aluminio, sino que también provoca que sea más segura la experimentación y facilita la observación al ser un líquido transparente.

En nuestro modelo, la remoción de hidrógeno en el aluminio fundido será simulada con la eliminación de oxígeno en agua, como se muestra en la **Figura 18**.

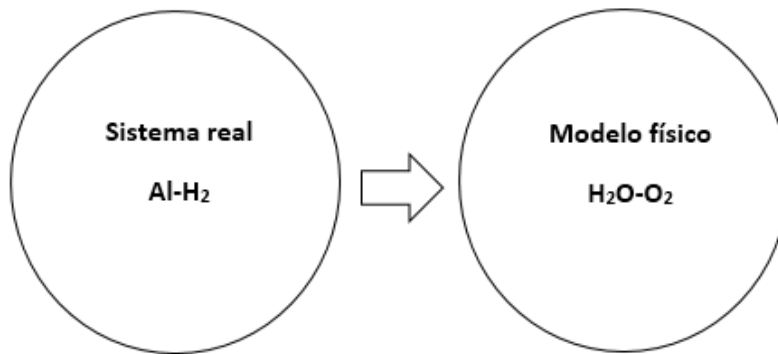


Figura 18.- Relación del sistema real con el modelo físico utilizado.

3.2 Criterios de similitud y números adimensionales

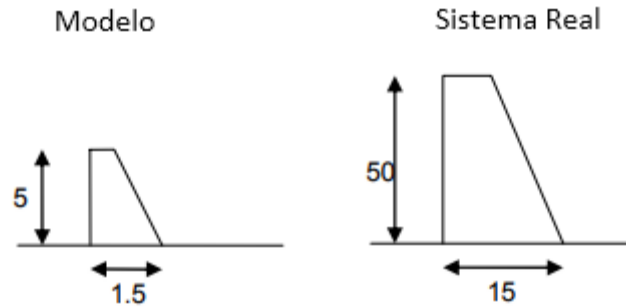
Para que el modelo físico pueda representar lo que ocurre en el sistema real, este modelo debe de cumplir con ciertos criterios de similitud. Algunos de estos criterios de similitud se representan con grupos adimensionales que están formados por variables que relacionan magnitudes fundamentales o derivadas.

El valor de estos números adimensionales nos indica cómo será el comportamiento del sistema, y si tenemos dos sistemas con un comportamiento adimensional similar, podemos decir que el modelo será una representación fiel del sistema real.

Los criterios de similitud que son de relevancia para el estudio del fenómeno que se estudiarán son los siguientes:

- Similitud geométrica: la semejanza geométrica se refiere a las relaciones entre las magnitudes geométricas y que estas se mantengan constantes entre el modelo y el sistema real. Estas magnitudes son la longitud (L), el área (L²) y el volumen (L³).

Por ejemplo:



Escala 1:10

Entonces, la relación entre las longitudes características del modelo y el elemento real deben mantenerse constantes:

$$\lambda_G = \frac{L_r}{L_m} = \frac{d_r}{d_m} = \frac{H_r}{H_m}$$

Donde los subíndices r y m hacen referencia al sistema real y modelo respectivamente, y λ_G es el coeficiente de semejanza geométrica.

Para el caso del modelo físico que estaremos trabajando el escalamiento es de 1:1, por lo cual las medidas deberán ser iguales en el modelo y en el elemento real.

Tabla 1.- Dimensiones del reactor tipo Batch y del modelo físico.

Parámetro	Reactor industrial	Modelo físico
	(cm)	(cm)
Altura del líquido	50	50
Altura del rotor	15	15
Radio del rotor	8	8
Radio interno del reactor	25	25
Radio externo del reactor	65	27
Altura del reactor	106	63

Las medidas del reactor industrial y del modelo coinciden en su mayoría a excepción del radio externo y la altura del reactor. En lo que se refiere al radio externo, a nivel industrial el reactor tipo Batch presenta un recubrimiento de material refractario que contiene el metal líquido y evita pérdidas de calor a través de las paredes; en nuestro modelo físico fabricado en acrílico no es necesario este recubrimiento y, por consiguiente, las paredes son más delgadas.

En cuanto a la altura del reactor, en el sistema real la altura se exagera por cuestiones de seguridad, ya que evita derrames desde la parte superior, en nuestro caso, el modelo no requiere esta sobredimensión en la altura ya que estaremos utilizando agua y los derrames de este líquido no presentan un riesgo mayor para las personas que se pudieran encontrar en los alrededores.

- Similitud dinámica: dentro del proceso que se analizará existen dos números adimensionales que ayudan a caracterizar el comportamiento del sistema, estos números adimensionales son el número de Reynolds y el número de Froude modificado.

Estos grupos adimensionales gobiernan la dinámica del fluido cuando este es agitado con el rotor y también en el caso del ascenso de la fase gaseosa a través del líquido. Es importante que los números adimensionales sean similares en el caso del sistema real y del modelo físico para asegurar que el comportamiento de ambos es similar y pueden ser comparables.

En este trabajo se utilizarán datos calculados en trabajos previos para justificar las similitudes geométrica y dinámica.

$$\text{Número de Reynolds: } \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho_l * V * d_p}{\mu}$$

$$\text{Número de Froude modificado: } \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas gravitatorias}} = \frac{\rho_g * v^2}{(\rho_l - \rho_g) * g * d_p}$$

ρ_l = densidad del líquido (Kg/m³)

ρ_g = densidad del gas (Kg/m³)

V = velocidad del rotor (round/s)

μ = viscosidad (Kg/ms)

d_p = diámetro de la propela (m)

g = gravedad (m/s²)

Tabla 2.- Números adimensionales obtenidos para los criterios de similitud.

	Velocidad angular (m/s)	RPM	Número de Reynolds	Número de Froude modificado
Reactor industrial	1.32	158	1202683	0.0148
	2.639	315	2405550	0.0372
Modelo físico	2.4295	290	1202722	0.0148
	4.86	580	2405449	0.0372

En la **Tabla 2** se puede observar que tanto el número de Reynolds como el número de Froude para el sistema real y para el modelo físico son muy parecidos, esto nos indica que tienen una similitud de comportamiento, y por lo tanto, es válido compararlos entre sí.

3.3 Fabricación y diseño de las propelas

Como primera parte del trabajo experimental se fabricaron tres propelas de diferentes geometrías, que fueron diseñadas tomando en cuenta los tamaños establecidos en los criterios de similitud geométrica. Los diseños fueron construidos con base en propelas observadas en libros especializados en el tema y en trabajos previos.

Las propelas se fabricaron con un polímero de bajo punto de fusión conocido como plástico polimórfico. Este plástico tiene la propiedad de ser maleable al introducirse en agua caliente (alrededor de 60°C) y posteriormente solidifica completamente al ser introducido en agua fría.

Para la fabricación de las propelas se utilizó una parrilla eléctrica para calentar agua, posteriormente se introduce el polímero polimórfico y se espera de 5 a 10 minutos hasta que el material se torna transparente. A continuación, se retira el material del agua caliente con ayuda de una espátula y se prosigue a darle la

forma deseada con las manos o con ayuda de un molde. Una vez que se tiene la forma deseada se introduce el plástico en un recipiente en agua con hielos y se espera un par de minutos a que el material endurezca, en la **Figura 19** se observa el aspecto físico de plástico polimórfico.

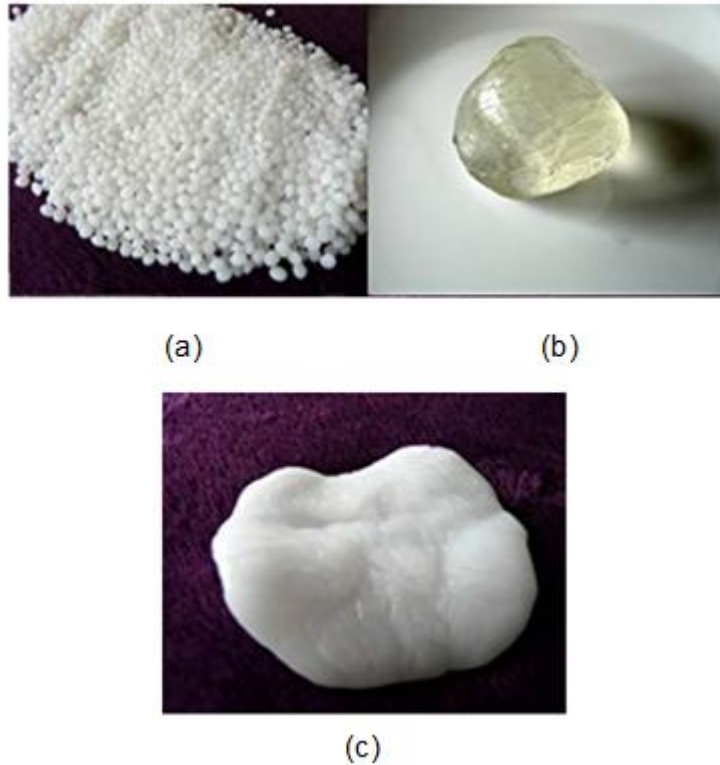


Figura 19.- Polímero polimórfico: (a) nuevo, (b) después de ser sometido con agua a 60°C, (c) endurecido en agua fría.

Con el procedimiento explicado previamente se fabricaron tres rotores nombrados Propela #1, #2 y #3 respectivamente, como se muestran de la **Figura 20** a la **21**.



Figura 20.- Propela 1.

Propela #1: Este diseño presenta una base circular de 8cm de radio con impulsores con geometría romboide con una altura de aproximadamente 1.5cm.

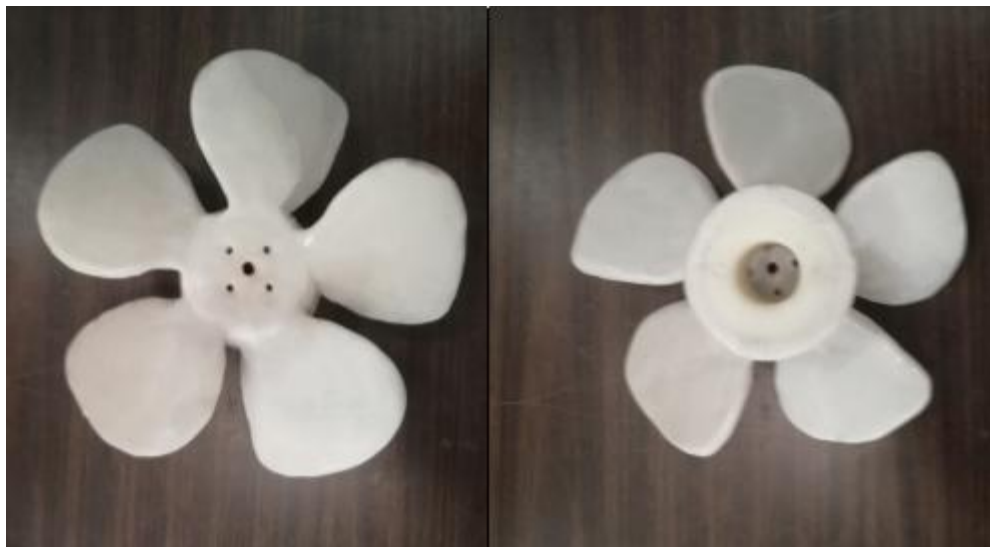


Figura 21.- Propela 2.

Propela #2.- Este rotor es similar a los llamados rotores marinos, presenta cinco impulsores de tipo helicoidal distribuidos alrededor del centro. En la parte central del rotor se hicieron perforaciones para permitir el paso de gas de purga proveniente del eje.



Figura 22.- Propela 3.

Propela #3: Este rotor, al igual que la Propela 1, está constituido por una base circular de 8cm de radio. Los impulsores tienen una forma semicircular.

3.4 Arreglo experimental y descripción del equipo

El montaje experimental se muestra en la **Figura 23** en la cual se enumeran cada uno de los componentes del sistema; de la **Figura 24** a la **Figura 27** se presentan cada uno de los instrumentos utilizados en las mediciones, así como una breve descripción de su funcionamiento.

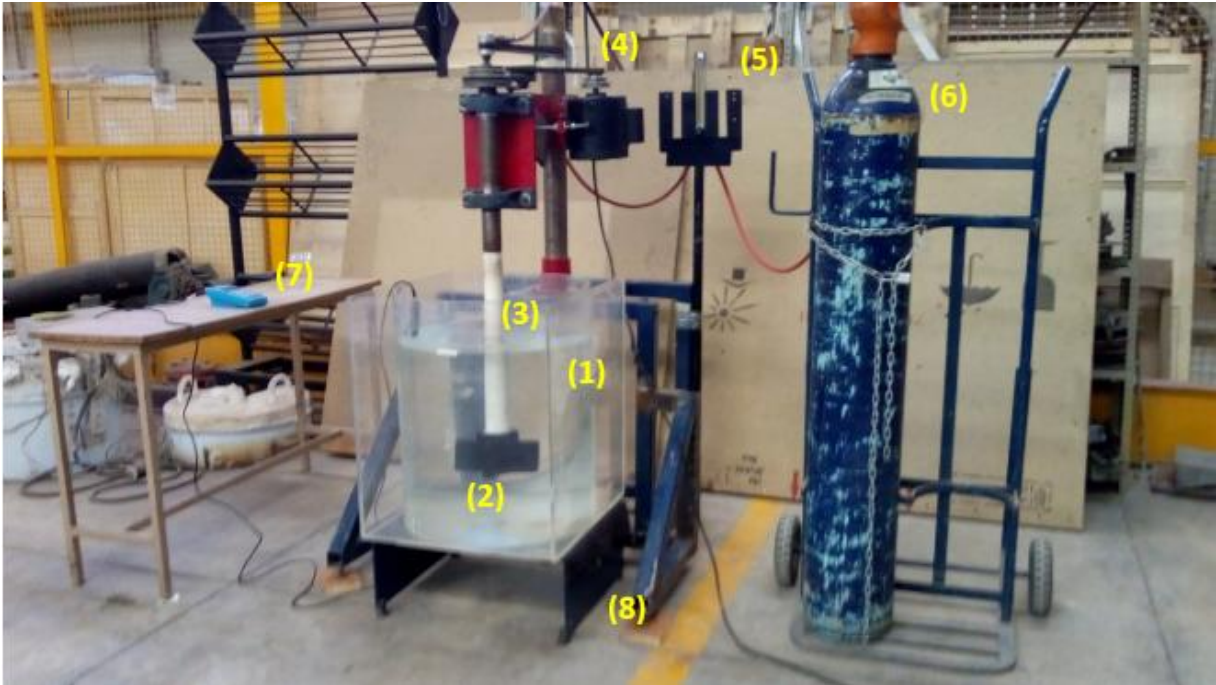


Figura 23.- Arreglo experimental.

1. Modelo físico de acrílico.
2. Propela de plástico polimórfico.
3. Flecha de Nylamid.
4. Rotor mecánico.
5. Flujómetro.
6. Tanque de gas (N₂).
7. Oxímetro.



Oxímetro medidor marca Hanna® modelo HI9146 con electrodo de membrana y sensor de platino.

Figura 24.- Oxímetro y electrodo.

Tacómetro digital marca Lutron® modelo SM6234E utilizado para medir las RPMs del rotor mecánico.

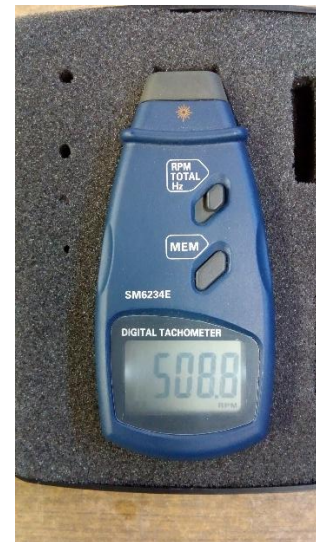


Figura 25. - Tacómetro digital.



Flujómetro marca Cole Parmer® con escala de 0 a 150 NI/min

Figura 26.- Flujómetro.

Compresor de aire marca Coleman ® modelo powermate. Utilizado en las pruebas cualitativas para observar el comportamiento de las burbujas y en las pruebas cuantitativas para saturar el agua con oxígeno.



Figura 27. – Compresor de aire.

3.5 Procedimiento experimental

1. Primero se centró correctamente el modelo físico con respecto al eje del rotor, ya que si el modelo se encuentra fuera de posición la dinámica del fluido será diferente a la esperada.
2. Llenar el modelo hasta la altura especificada de 50 cm con agua limpia.
3. Introducir el electrodo dentro del modelo físico por un periodo de 5 a 10 minutos para acondicionarlo, posteriormente se calibró introduciendo la temperatura del medio y la presión.
4. Saturar de oxígeno el agua incorporando aire a través de una lanza conectada con una manguera a la toma de aire del laboratorio. El tiempo de oxigenación será de 5 a 10 minutos o hasta que el oxímetro llegue a 6ppm, o lo que es lo mismo, 100% de oxígeno.*
5. Prender el rotor y ajustar la velocidad de rotación requerida con ayuda del tacómetro.
6. Abrir la llave de salida del tanque de gas y ajustar con el flujómetro el flujo de nitrógeno de entrada al sistema.*
7. Al comenzar a adicionar el gas de purga, se tomó nota de la cantidad de oxígeno instantánea cada 20 segundos hasta que el contenido de oxígeno en el agua llegue al límite inferior o hasta que se alcancen 10 minutos de desoxigenación. *

*Solo en pruebas cuantitativas.

3.6 Pruebas Cualitativas

3.6.1 Elección de las variables de trabajo

Además de los tres diseños de rotores que serán probados en el modelo físico, durante la experimentación se utilizaron otras variables de interés, como son la velocidad de rotación (rpm) y el flujo de gas inyectado (Q). Más específicamente, el gas de purga que ocuparemos durante las pruebas es nitrógeno de calidad industrial.

Para conocer el valor de las variables que se utilizaron en las pruebas con nitrógeno se realizaron experimentos preliminares inyectando aire con la ayuda de un compresor y así poder observar el comportamiento de cada una de las propelas.

La razón principal de llevar a cabo estas pruebas previas es la de observar tres puntos de relevancia en el proceso de desgasificación, estos tres factores son: el tamaño de burbuja, la distribución de las burbujas en el tanque y la formación del vórtice.

A continuación, se explica la razón por la cual estos tres factores son de suma importancia al momento de discriminar un rango amplio de variables.

- **Tamaño de burbuja:** Se busca durante los experimentos que la burbuja de gas formada sea lo más pequeña y fina posible, ya que con estas características se logra una mayor área superficial de contacto burbuja-líquido y la completa eliminación de oxígeno se logrará a tiempos más cortos.
- **Distribución de las burbujas en el tanque:** Al momento de inyectar el gas en el fluido se forma una burbuja que tiende a ascender hacia

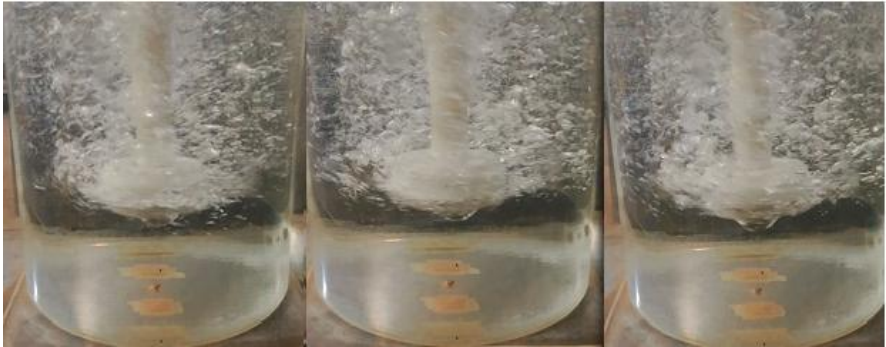

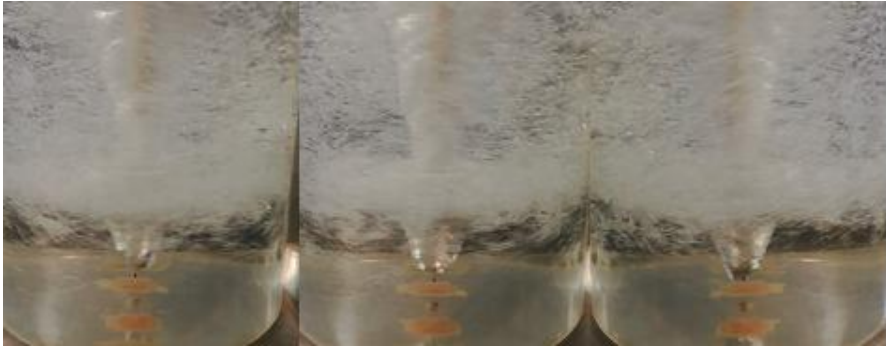
la superficie a consecuencia de una diferencia de presiones. Si el diseño del impulsor y la velocidad de rotación son los adecuados, la burbuja será dispersada hasta el fondo del tanque aumentando el tiempo de permanencia y, por consiguiente, eliminando una cantidad mayor de oxígeno antes del ascenso y ruptura de la burbuja. Además, una buena distribución de las burbujas nos ayuda a eliminar las zonas muertas en el tanque.




- **Formación del vórtice:** Durante la desgasificación el sistema se encuentra siendo agitado por la acción del rotor que gira continuamente. En la superficie del líquido se empieza a formar una espiral a consecuencia del flujo circular, esta espiral llamada vórtice tiende a incorporar aire al sistema y, por consiguiente, se vuelven a disolver gases indeseables; en el modelo físico el oxígeno y en el sistema real el hidrógeno. Dicho lo anterior, controlando la formación y crecimiento del vórtice, podemos evitar que los tiempos de desgasificación no se prolonguen más de lo necesario.

En una primera parte se realizaron experimentos con cada una de las propelas propuestas a dos diferentes velocidades de rotación, la primera una velocidad baja de 315 rpm y la segunda una velocidad alta de 597 rpm. A su vez, para cada una de estas velocidades fueron probadas con un flujo de aire de 92 NI/min y 144 NI/min, dándonos un total de 12 pruebas. Las condiciones de velocidad de rotación y de flujo fueron tomadas de un trabajo previo ^[12]. (N=condiciones normales de presión y temperatura).

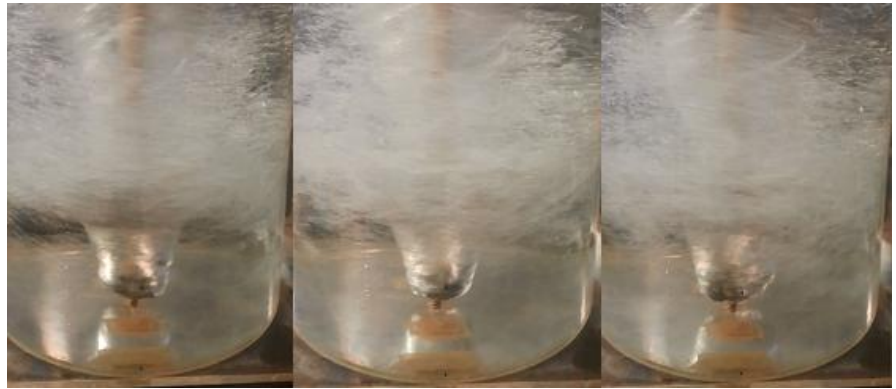
Cada uno de los experimentos fue grabado en video y se sometió a un análisis visual de forma cualitativa, como se observa en la **Tabla 3** y **4**.

Tabla 3.- Combinación de variables en la primera parte de las pruebas preliminares.

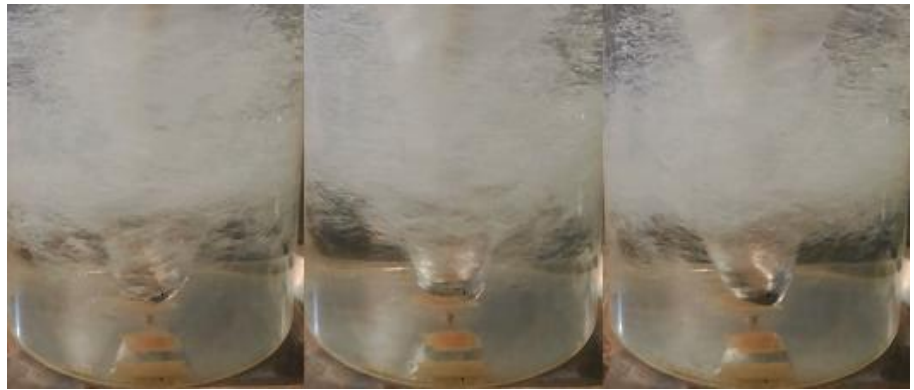
<p>P#1 315 rpm y 92 NI/min</p>	
<p>P#1 315 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#1 597 rpm y 92 NI/min</p>	

<p>P#1 597 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#2 315 rpm y 92 NI/min</p>	
<p>P#2 315 rpm y 144 NI/min</p>	

P#2
597 rpm y 92 NI/min

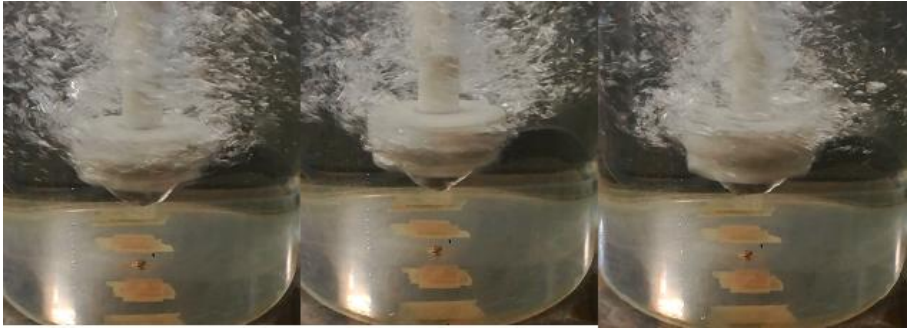
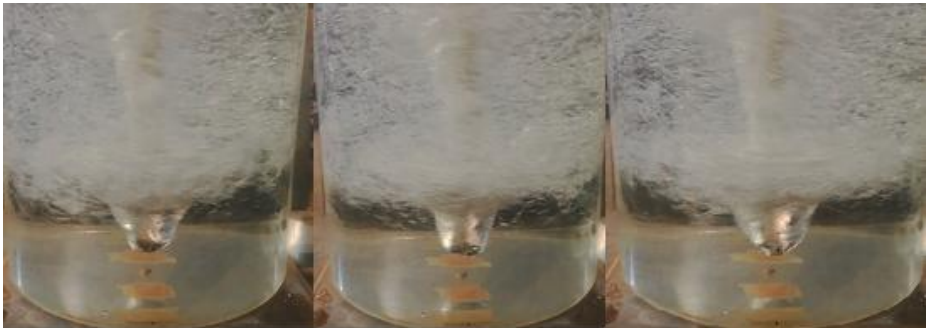
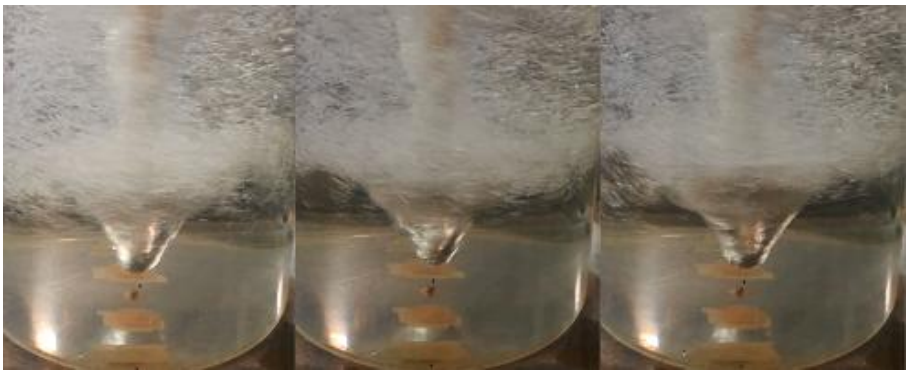


P#2
597 rpm y 144
NI/min



P#3
315 rpm y 92 NI/min



<p>P#3 315 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#3 597 rpm y 92 NI/min</p>	
<p>P#3 597 rpm y 144 NI/min</p>	

Durante la revisión de los videos se observó que a condiciones de 315 rpm, tanto para flujos altos y bajos, la velocidad de rotación es muy lenta y no alcanza a distribuir adecuadamente la burbuja en el tanque. La burbuja de

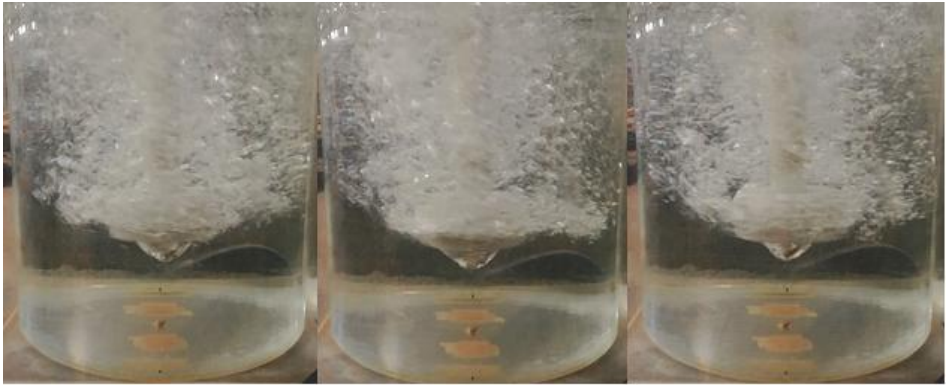


gas tiende a subir inmediatamente a través del eje en cuanto sale del rotor, provocando tiempos de permanencia de la burbuja muy cortos.

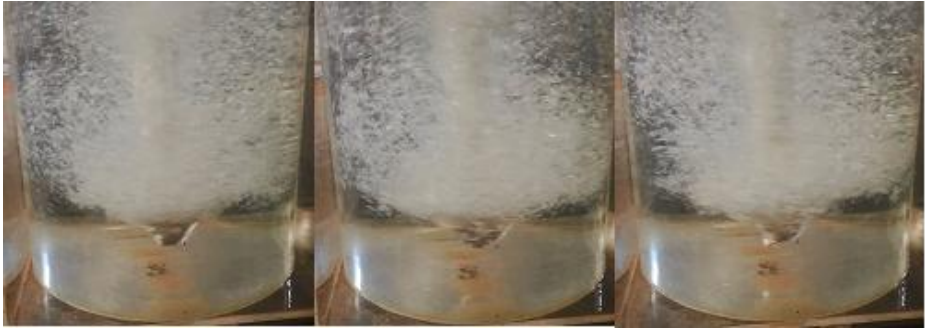
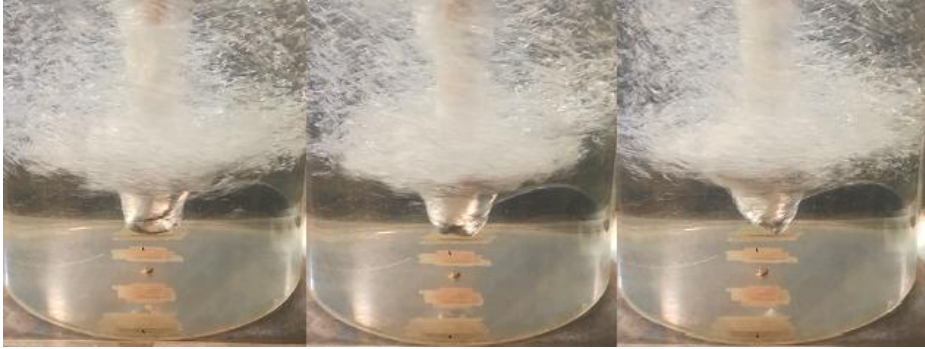
Por otra parte las pruebas corridas a una velocidad de 597 rpm con flujo de 144 NI/min mostraron unas burbujas pequeñas y con una buena distribución en el tanque, pero la alta velocidad de rotación en el sistema provoca que el vórtice crezca demasiado, hasta llegar al fondo del tanque, además de que el líquido se derramaba fuera del reactor durante los experimentos.

Por esta razón se decidió tomar una velocidad de rotación intermedia que no sea tan lenta como la de 315 rpm, pero que tampoco genere una excesiva turbulencia, como la de 597 rpm. Para conocer el valor exacto de esta velocidad, se realizó una prueba con velocidades de 350 a 550 rpm con aumentos de 50 en 50 unidades únicamente utilizando la propela #1.

En lo que se refiere al flujo de gas, en pruebas realizadas con 92 NI/min, la densidad de burbujas formadas en el líquido para la mayoría de las pruebas es muy pobre, por lo cual se tomó la decisión de ocupar el flujo de 144 NI/min.

Tabla 4.- Pruebas para determinar velocidad de operación, segunda parte de las pruebas preliminares.

<p>P#1 350 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#1 400 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#1 450 rpm y 144 NI/min</p>	

<p>P#1 500 rpm y 144 NI/min</p>	
<p>P#1 550 rpm y 144 NI/min</p>	

Analizando visualmente cada una de las pruebas realizadas, se observó que a las velocidades de rotación de 350 y 400 rpm la propela no tiene el impulso necesario para distribuir las burbujas en el tanque; además, las burbujas tienen un tamaño grande y ascienden casi inmediatamente después de salir por el eje del rotor. Una de las ventajas en estas dos condiciones de velocidad es que el vórtice formado es muy pequeño y no se extiende demasiado.

En contraste, las pruebas a 500 y 550 rpm las burbujas formadas son finas y bien dispersadas en el sistema, pero la problemática, como ya se había mencionado antes para pruebas de alta velocidad, es la formación del vórtice que se extiende demasiado y tiene una amplitud considerable, lo cual durante las pruebas cuantitativas provoca la introducción de aire en el sistema y, por consiguiente, la adición de oxígeno en el líquido.

A la velocidad de 450 rpm las evidencias muestran un tamaño adecuado de burbuja, que si no es tan fina como en el caso de 500 y 550 rpm, tampoco es grande y voluminosa como en las pruebas a velocidades de 350 y 400 rpm. La distribución de las burbujas se observa uniforme y llega hasta las paredes del tanque sin problemas. Trabajando a estas condiciones de velocidad no se incrementa el tamaño del vórtice, teniendo un vórtice de tamaño aceptable para la desgasificación.

Por lo anterior se puede decir que las condiciones de 450 rpm y 144 NI/min son las más adecuadas para probar los nuevos rotores en las pruebas cuantitativas con gas nitrógeno.

3.7 Pruebas Cuantitativas

3.7.1 Consideraciones experimentales

- El electrodo del oxímetro deberá ser sumergido hasta la parte gruesa y nunca sumergirlo completamente, ya que de ocurrir esto, el equipo se dañara y quedará fuera de uso.
- El sensor de platino del electrodo siempre debe estar posicionado hacia el centro del tanque.
- La medición de oxígeno deberá de realizarse en los extremos del modelo, lo más alejado de la formación del vórtice, ya que en la zona cercana al vórtice la variación de oxígeno es muy grande a consecuencia del aire que se incorpora a través del vórtice.
- El electrodo se coloca en la misma posición para todas las pruebas con la finalidad de que sea reproducible el experimento y tiene que ser agitado constantemente durante toda la prueba.
- Realizar todas las pruebas a la misma hora del día para evitar que haya una variación considerable en la temperatura del ambiente (recordar que la

solubilidad del oxígeno en el agua está en función de la temperatura y de la presión).

3.7.2 Efecto del baffle

En los tanques de agitación de uso industrial que cuentan con propelas de paleta o tipo marino, el método más conveniente para reducir la formación de vórtices o remolinos es la instalación de baffles o placas deflectoras. Estos deflectores son pequeñas paletas verticales añadidas a los lados de los tanques de mezclado para mejorar la eficiencia de la mezcla.

Los deflectores evitan que se forme un vórtice en el centro del tanque. Aunque un vórtice puede parecer un método de mezclado eficiente, la realidad es que no mezcla el fluido de manera correcta. Específicamente para el caso de estudio de este trabajo, la formación de un vórtice en la parte superficial del sistema resulta perjudicial ya que propicia la entrada de aire en el líquido, que termina disolviéndolo y, por consiguiente, prolongando los tiempos de desgasificación.

Los baffles generalmente se extienden desde la parte superior del tanque hacia el interior de este, aunque también existen baffles asegurados a las paredes del tanque. La implementación de cualquiera de estas maneras de colocación depende del diseño del equipo.

La anchura de un deflector debe ser $1/12$ del diámetro del tanque que se está utilizando y la altura no debe extenderse más allá de la profundidad del líquido.

Se pueden colocar de uno hasta cuatro baffles. En el caso de un tanque con cuatro baffles la resistencia que recibe el líquido al movimiento radial es mayor en comparación con un tanque con un solo deflector. Algunos parámetros para la elección del número de baffles a colocar son la potencia del equipo, la viscosidad y la dinámica del fluido.

3.7.3 Diseño experimental

Para la segunda parte de los ensayos experimentales se corrieron pruebas con los tres diferentes diseños de rotores, propela #1, #2 y #3, a las condiciones de 450 rpm y 144 NI/min. La primera serie de pruebas se llevaron a cabo de manera normal sin el uso de ninguna herramienta adicional a la propela. Posteriormente, la segunda serie de corridas, se realizó introduciendo un baffle en el sistema como se observa en la **Figura 28**, fijándolo a la estructura del rotor mecánico.

Todas las pruebas se realizaron por duplicado para asegurar la reproducibilidad del experimento.

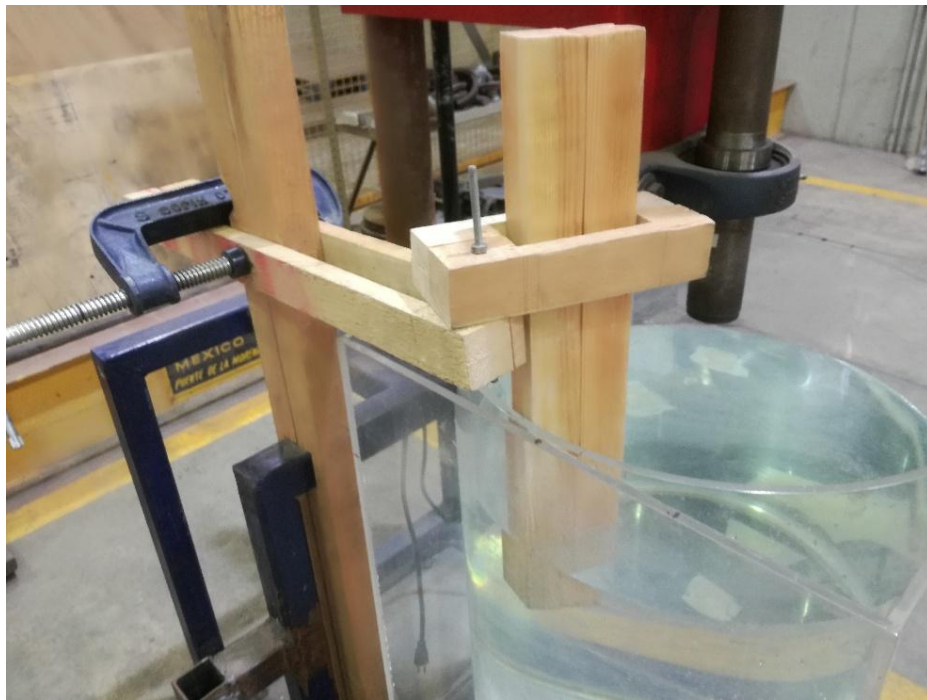


Figura 28. – Baffle de madera, permite eliminar el vórtice del líquido.

4 Resultados y análisis de resultados

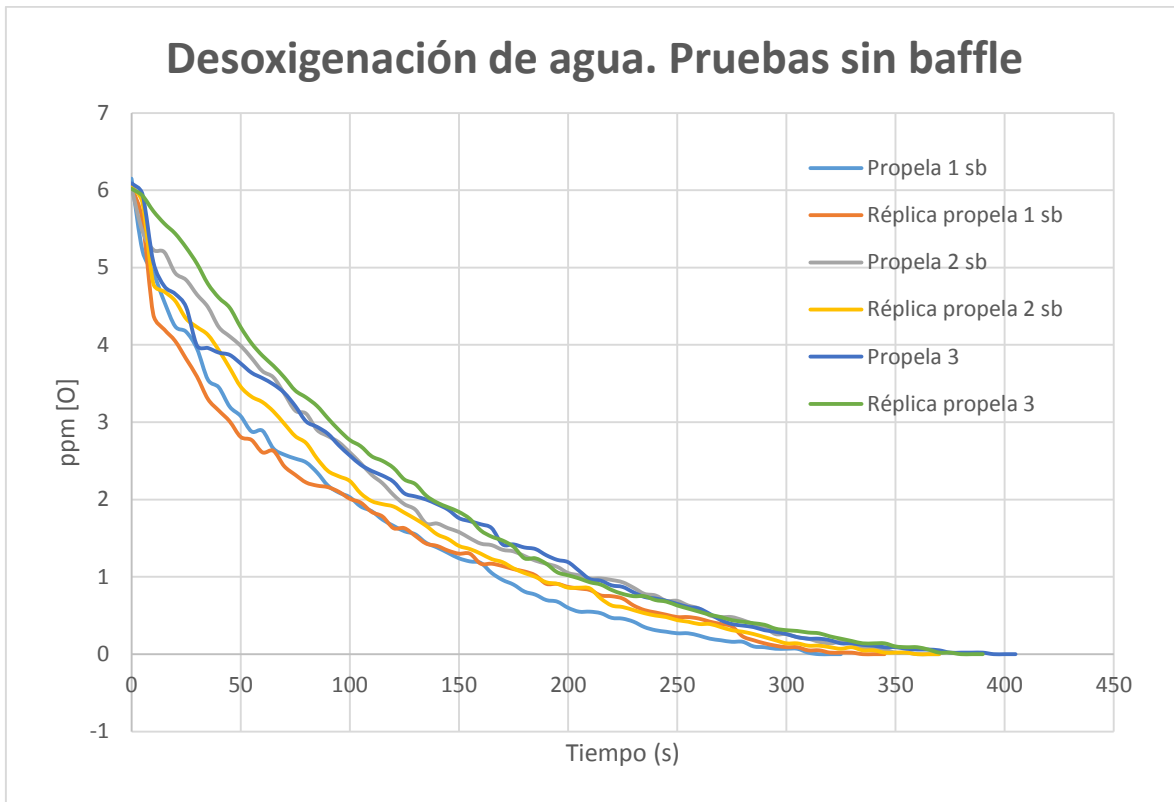
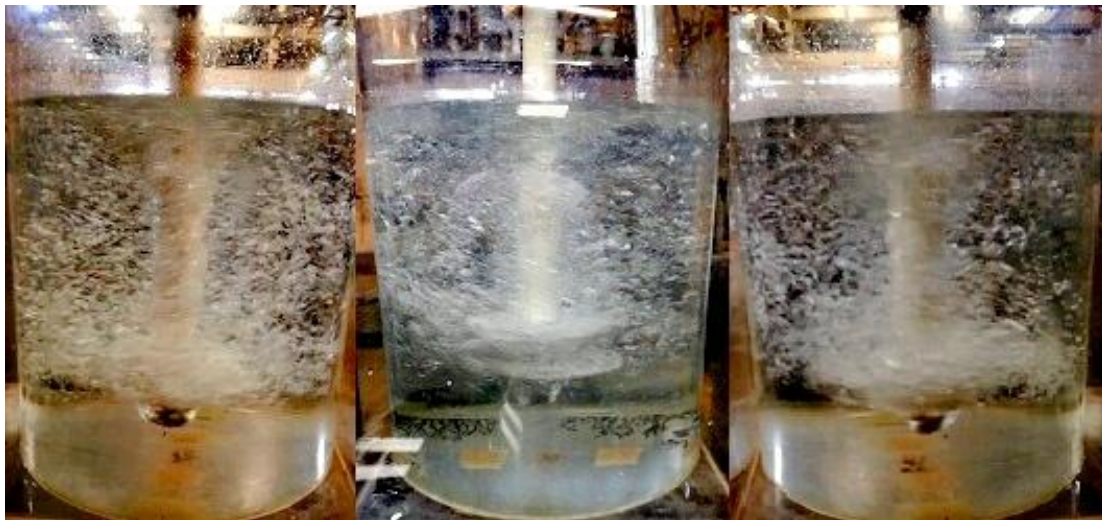


Figura 29. – Curvas de desgasificación experimentales a 450 rpm y 144 NI/min.
sb: sin baffle.

En la primera serie de pruebas realizadas sin el uso del baffle, el rotor P#1 logra un tiempo de desgasificación total de 5min con 10s y la réplica de esta curva se encuentra en 5min 30s, como se puede observar en la **Figura 29**, siendo este diseño el más veloz durante el proceso de desgasificación. En contraste, los tiempos de desoxigenación del rotor P#3 son los más prolongados, llegando a 6min 30s y 6min 15s, prueba y réplica respectivamente. La propela P#2 logra tiempos intermedios entre los otros dos diseños, estos tiempos rondan los 6min de desgasificación total.

En la **Figura 30** observamos una comparación de la distribución y tamaño de burbuja de cada una de los rotores durante las pruebas cuantitativas, es notable que el tamaño de las burbujas de las pruebas del rotor P#1 son más pequeñas y finas en comparación con el rotor P#3, el cual expulsa burbujas más gruesas, dando razón de la importancia del papel que juega el área interfacial en la desgasificación del sistema.



(a)

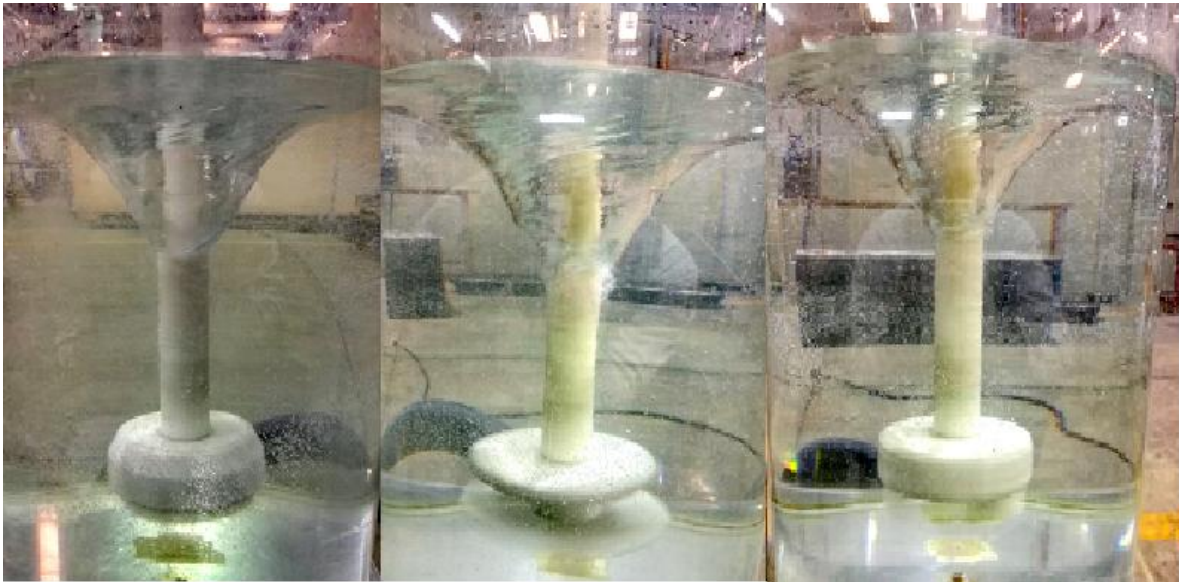
(b)

(c)

Figura 30. – Dispersión de burbujas de los tres diferentes rotores a) P#1, b) P#2 y c) P#3.

En lo que se refiere a la P#2, el tamaño de burbuja se observa pequeño y fino, incluso más que las burbujas de la P#1, aunque la distribución de estas burbujas no es tan uniforme en comparación con el efecto de la propela P#1.

Otro factor de importancia a analizar es la formación del vórtice, para esto se tomaron imágenes de los rotores funcionando a la velocidad correspondiente de 450 rpm sin la inyección de nitrógeno para poder apreciar mejor el tamaño del vórtice formado, esto muestra en la **Figura 31**.



(a)

(b)

(c)

Figura 31. – Comparación de los vórtices formados en tres diseños propuestos.

(a) P#1, (b) P#2 y (c) P#3.

Analizando la **Figura 31** es notable a simple vista que el vórtice formado por el rotor P#2 es más grande y tiene mayor profundidad en comparación con el vórtice de los otros dos diseños. El vórtice formado por el efecto del rotor P#3 es más chico que el de los otros dos rotores, pero realmente la diferencia visual es muy pequeña en comparación con el vórtice del rotor P#1.

Es importante mencionar que, a pesar de que el rotor P#3 presenta el vórtice más pequeño de los tres diseños, los tiempos de este rotor son los más grandes. De esta forma podemos darnos cuenta que una rápida desgasificación depende de la combinación de diferentes factores, como son: la extensión del vórtice formado, la distribución de las burbujas y tamaño de estas, y no solamente de uno de estos factores de manera aislada.

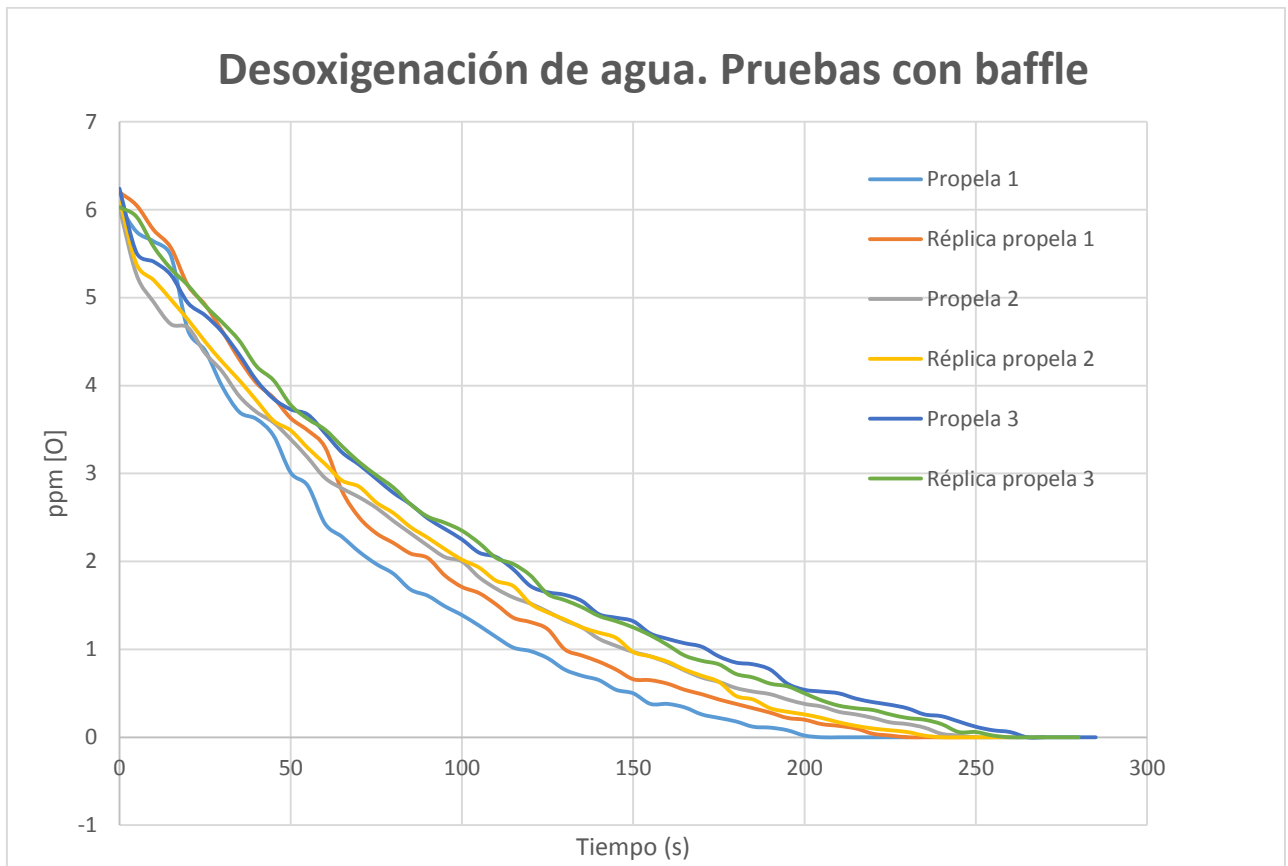


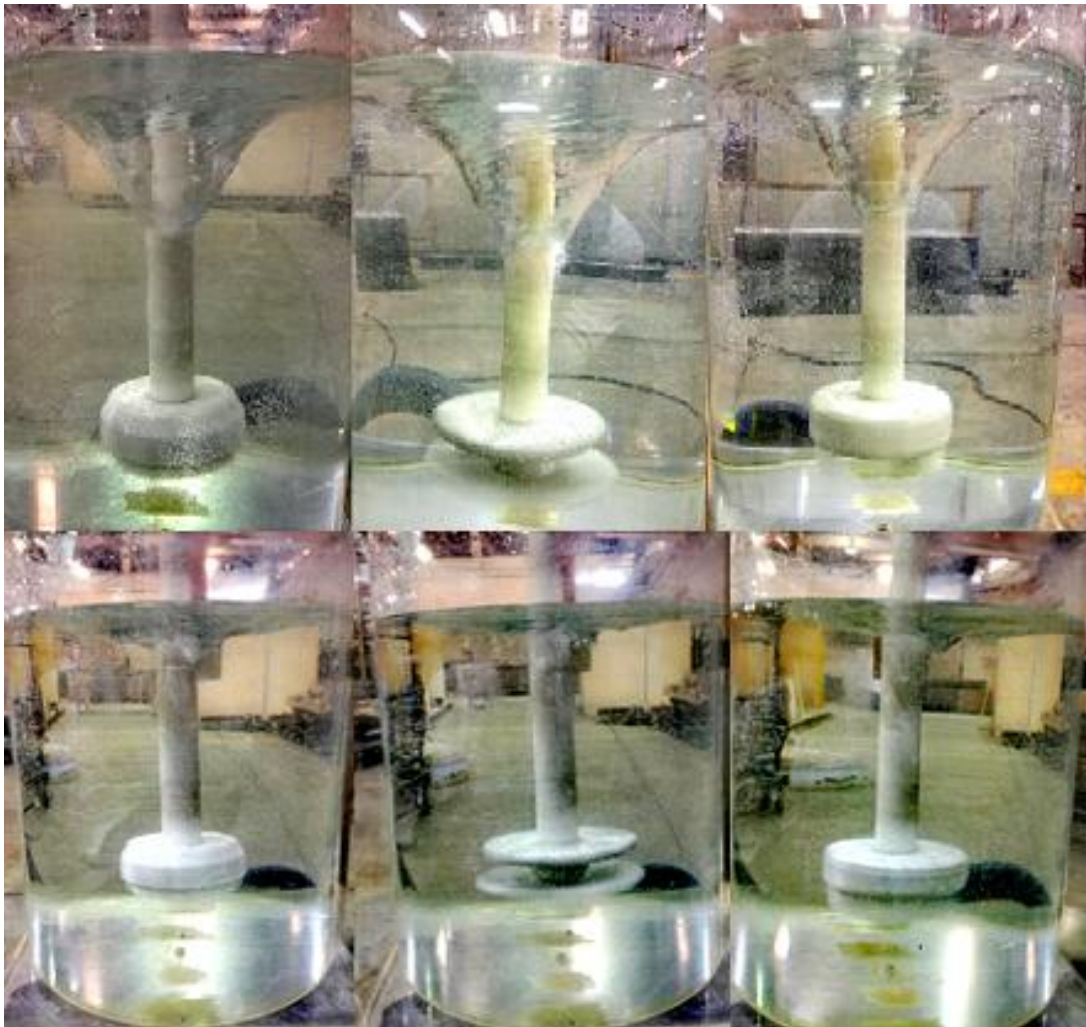
Figura 32. – Curvas de desgasificación experimentales con el uso de baffle a 450 rpm y 144 NI/min.

En las pruebas que se realizaron con la adición de un baffle los tiempos se redujeron notablemente; para la propela P#1 el tiempo de desgasificación total pasó de 5min 10s a 3min 20s, con una reducción en el tiempo de desgasificación del 35.5%, como se puede observar en la **Figura 32**. La propela P#2 disminuye de 6min en los experimentos sin baffle a 4min 5s en las pruebas con el baffle instalado; 31.9% fue el porcentaje calculado en cuanto a reducción de tiempo. Por último, la propela P#3 acortó el tiempo de 6min 30s a 4min 20s, disminuyendo el tiempo de desoxigenación total en 33.3%.

En la **Figura 33** observamos una comparación en la formación de los vórtices en las pruebas con y sin baffle llevadas a cabo en las mismas condiciones de velocidad. Para cada uno de las pruebas observamos el efecto del deflector que

prácticamente elimina la formación del vórtice en el sistema. Al impedir la formación y crecimiento del vórtice evitamos una reoxigenación del líquido; esta redisolución de gases ocurre al incorporarse aire a través del vórtice.

Descartar el efecto del vórtice al instalar un baffle justifica la reducción de los tiempos de desgasificación en una tercera parte para los tres diseños probados; también es importante mencionar que la formación o inhibición del vórtice no afecta la distribución y tamaño de las burbujas, las cuales son propias del diseño del rotor.



(a)

(b)

(c)

Figura 33. – Comparativa de pruebas realizadas sin baffle en la parte superior y con baffle en la parte inferior (a) P#1, (b) P#2 y (c) P#3.

Para cada una de los experimentos realizados, las pruebas iniciales y sus respectivas réplicas no presentaron una diferencia en tiempo mayor a 25 segundos, por lo cual podemos asegurar que los experimentos son reproducibles.

5 Conclusiones

Realizado el análisis de los resultados obtenidos durante la experimentación, se considera que las siguientes conclusiones son las más relevantes del trabajo.

- Gracias a que el modelo físico es traslúcido y el agua con el que se realizaron las pruebas es transparente se puede hacer un análisis visual para elegir las mejores condiciones de operación para el proceso de desgasificación.
- De los tres diferentes diseños fabricados, la propela P#1 presenta el mejor desempeño al momento de desoxigenar totalmente el sistema en el tiempo más breve. El rotor P#1 logra desgasificar el modelo en 5 minutos 10 segundos para las pruebas sin baffle y 3 minutos 20 segundos para las pruebas con baffle instalado. Estas conclusiones son válidas para las condiciones de flujo de gas y de velocidad de rotación utilizadas.

- A pesar de que se mantuvieron constantes las condiciones de velocidad de rotación y flujo de gas en las pruebas cuantitativas, el tamaño y distribución de las burbujas de gas es diferente para cada uno de los rotores diseñados.
- A la velocidad de rotación de 450 rpm, el rotor P#3 presenta el vórtice más compacto en comparación con los otros dos diseños fabricados; sin embargo, los tiempos de desgasificación de este rotor son los que más se prolongan a consecuencia de una mala distribución de burbujas y un tamaño grande de burbujas.
- El uso del baffle en el modelo físico reduce el tiempo de desgasificación en aproximadamente un tercio para los tres diseños probados, esto se debe a que prácticamente anula la formación del vórtice que tiende a reincorporar aire al sistema durante el proceso de desgasificación.

Bibliografía

[1]International Alluminum Institute. (2009). Global Aluminium Reciclyng: A cornerstone of sustainable development. Recuperado el 7 de Febrero del 2018,http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fl0000181.pdf

[2]International Alluminum Institute. Recuperado el 7 de Febrero del 2018,<http://www.world-aluminium.org/statistics/#map>

[3] “Metals Handbook Volume 15 Castings”. (1998). Estados Unidos. ASM International. Pp.459-461.

[4] Totten, George E. y MacKenzie D, Scott. “Handbook of aluminum vol.1: Physical metallurgy and processes”. (2003). Estados Unidos.Marcel Dekker Inc. pp. 595-596.

[5] Padilla Hernández, Itzayana. (2017). “Análisis del desempeño de dos rotores nuevos para el desgasificado de aluminio asistido por modelado físico y matemático” (tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.

[6] A. K. Gupta, B. K. Saxenia, S.N. Tiwari, et al (1992) “Review Pore Formation in Cast Metals and Alloys”, Journal of Material Science, volume (27), pp853-862.

[7] King, Frank. “El aluminio y sus aleaciones”. (1992). México. Limusa editores. México.

[8] Castillo Uribe, Vladimir.(2013). “Diseño y cálculo de un agitador de fluidos”(tesis de licenciatura), Universidad del Bío-Bío, Chile. pp. 6-7.

[9] Treybal, Robert E. “Operaciones de transferencia de masa”. 2^{da} edición. Estados Unidos. McGraw Hill. pp. 166.

[10] Bingbing Wan, Weiping Chena, Mengdi Mao, et al (2018), “Numerical Simulation of a Stirring Purifying Technology for Aluminum Melt”, Journal of Materials Processing Tech, volume (251), pp.330–342.

[11] Camacho-Martínez, José Luis. Ramírez-Argáez, Marco A. González-Rivera, Carlos. et al (2012) “Novel Degasification Design for Aluminum Using an Impeller Degasification Water Physical Model”, *Materials and Manufacturing Processes*, volume (27:5), pp.556-560, DOI: 10.1080/10426914.2011.593234

[12] Santos Méndez, Valter Amadeus Alejandro. (2016). “Optimización de una olla de desgasificado equipada con el rotor inyector mediante modelado físico” (tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.