



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
QUÍMICA - METALURGIA

EVALUACIÓN Y DISEÑO DE UN NUEVO DISPOSITIVO DE ROTOR-INYECTOR
PARA EL PROCESO DE DESGASIFICADO DE ALUMINIO EN UN MODELO
FÍSICO DE AGUA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
I. Q. M. WIENER FERNANDO CRUZ MÉNDEZ

TUTORES PRINCIPALES

DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM
DR. FABIO ERNESTO MANCILLA RAMOS, CCADET, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ascanio Gasca Gabriel
Secretario: Dr. Campillo Illanes Bernardo Fabián
Vocal: Dr. Zenit Camacho José Roberto
1^{er} Suplente: Dr. Solorio Ordaz Francisco Javier
2^o Suplente: Dr. Ramírez Argáez Marco Aurelio

Lugar donde se realizó la tesis: Laboratorio de Solidificación y Simulación, Edificio D, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios de maestría.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de estudios de maestría con el número de CVU 596689, así como a la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México mediante el proyecto DGAPA-UNAM, PAPIIT IN114115.

A mi tutor el Dr. Marco Aurelio Ramírez Arguez, por los consejos durante mi vida académica.

Al Dr. Fabio Ernesto Mancilla Ramos, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), de la Universidad Nacional Autónoma de México por sus valiosos consejos, aportaciones, enseñanza, capacitación para el uso del equipo y colaboración durante la realización de este trabajo; sobre todo por su paciencia, amistad y las incontables horas de convivencia durante mi estudios de maestría.

A la Q. Eréndira García Ríos del Laboratorio de Cromatografía del Instituto de Química; al M. en I. Eduardo Bernal Vargas del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET); al D. I. Alberto Arturo Reyes Ronzón del Centro de Tecnología Avanzada A. C. (CIATEQ) por sus contribuciones en la realización de este trabajo.

Dedicatorias

A mi hijo Iván Dominic por alegrar mi vida con sus sonrisas, abrazos y caricias.

A mis padres Pilar y Fernando; a mis hermanos Derenise, Yaroslav y Leslie por su cariño; y por todo el apoyo durante el posgrado y alentarme en seguir con mis estudios de maestría.

A mis amigos Benjamín Beltrán, Ernesto Mancilla, Jaime Gutiérrez, Lamberto Díaz, Martha Rodríguez por sus aportaciones, consejos y por hacerme la vida más amena.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 12 |
| 1.1. Economía del aluminio a nivel mundial | 12 |
| 1.2. Demanda mundial del aluminio | 12 |
| 1.3. Importancia de la calidad metalúrgica de las piezas de aluminio | 14 |
| 2. Antecedentes | 15 |
| 2.1. Solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido | 15 |
| 2.2. Principales procesos de desgasificado del aluminio | 18 |
| 2.2.1. Remoción del hidrógeno | 18 |
| 2.2.2. Métodos de remoción | 19 |
| 2.3. Uso de rotores en la industria del aluminio | 25 |
| 2.4. Uso de rotores comerciales | 26 |
| 3. Fundamentos | 30 |
| 3.1. Modelado físico de procesos industriales | 30 |
| 3.1.1. Similitud general de procesos | 30 |
| 3.1.2. Niveles de similitud | 31 |
| 3.1.3. Similitud geométrica | 32 |
| 3.1.4. Similitud cinemática | 32 |
| 3.1.5. Similitud dinámica | 33 |
| 3.2. Números adimensionales | 34 |
| 3.2.1. Número de Reynolds | 35 |
| 3.2.2. Número de Froude | 35 |
| 3.2.3. Número de Weber | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV) | 36 |
| 3.3.1. Iluminación | 37 |
| 3.3.2. Adquisición de imágenes | 38 |
| 3.3.3. Análisis de imágenes | 39 |
| 3.3.4. Post-procesado | 41 |
| 4. Descripción experimental | 43 |
| 4.1. Métodos y materiales | 46 |
| 4.1.1. Modelo físico | 46 |
| 4.1.2. Velocimetría por imágenes de partículas | 50 |
| 4.1.3. Cinética de desgasificado | 51 |
| 5. Resultados | 53 |
| 5.1. Patrones de flujo | 54 |
| 5.2. Magnitud de la velocidad | 60 |
| 5.3. Campos de intensidad de turbulencia | 62 |
| 5.4. Capacidad de bombeo | 66 |
| 5.5. Cinética de desgasificado | 73 |
| 6. Conclusiones | 76 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Producción Mundial de Aluminio, 2000-2016 ^[23] | 13 |
| 2.1. Solubilidad de hidrógeno en aluminio, a) diagrama de solubilidad de hidrógeno en aluminio líquido y algunas aleaciones en función de la temperatura ^[29,49] , b) piezas coladas de aluminio con diferentes niveles de desgasificado ^[30] | 16 |
| 2.2. Mecanismo de formación de hidrógeno en aluminio líquido ^[8] | 17 |
| 2.3. Diagrama de un reactor del proceso IMN. | 20 |
| 2.4. Esquema de la unidad de desgasificado RDU. | 21 |
| 2.5. Diagrama del proceso ALCOA 503. | 22 |
| 2.6. Diagrama de un reactor para el proceso SNIF. | 23 |
| 2.7. Diagrama del proceso MINT. | 24 |
| 2.8. Proceso Alcan Compact Degasser. | 24 |
| 2.9. Esquema de un tanque de agitación con rotor-inyector, se muestran los diferentes parámetros geométricos que deben considerarse en esta configuración ^[45] | 26 |
| 2.10. Rotores turbulentos: a) patrones de flujo para rotores radiales; b) patrones de flujo para rotores axiales ^[45] | 27 |
| 2.11. Rotores utilizados por Saternus, para el análisis de la desgasificación del aluminio líquido ^[38] | 28 |
| 2.12. Rotores comerciales utilizados industrialmente desarrollados por la empresa FOSECO TM [7]. | 28 |
| 3.1. Configuración típica de un sistema de adquisición de velocimetría por imágenes de partículas. | 36 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.2. | Descripción de las diferentes técnicas de adquisición de imágenes ^[1] . . . | 39 |
| 3.3. | Obtención del vector de velocidad extraída de la correlación de dos imágenes ^[1] | 40 |
| 3.4. | Método de correlación cruzada para el procesamiento de imágenes de PIV ^[1] | 42 |
| 4.1. | a) Reactor industrial utilizado para la desgasificación de aluminio líquido. b) Modelo de acrílico utilizado ^[12] | 44 |
| 4.2. | Componentes principales del sistema PIV: a) cámara de alta velocidad; b) estación de trabajo; c) bomba de enfriamiento; d) sistema traverse; e) láser. | 45 |
| 4.3. | Configuración experimental empleada en la experimentación: a) Dimensiones del arreglo; b) imagen del arreglo. | 47 |
| 4.4. | Fotografías de los tres rotores utilizados en este trabajo. La primera columna muestra la vista superior, segunda columna, vista lateral, tercera columna, vista inferior. La primera y segunda fila corresponden a los rotores comerciales, fila 1, rotor estándar, fila 2, rotor muescado. La fila 3 corresponde al nuevo de diseño de rotor propuesto en este trabajo. | 49 |
| 4.5. | Esquema del montaje experimental: 1) motor; 2) flecha del impulsor; 3) rotor-inyector; 4) tanque; 5) flujometro de gas; 6) medidor de oxígeno disuelto; 7) caja de visualización; 8) cámara de alta velocidad; 9) láser pulsado. | 52 |
| 5.1. | Fotografías de los tres rotores utilizados en este estudio a a las tres diferentes condiciones de inyección de gas (0, 10 y 40 LPM). Se observan los diferentes estados hidrodinámicos en la olla, puede notarse la diferencia en la dispersión del gas y la formación de diferentes tamaños de burbujas. a) rotor estándar; b) rotor muescado y c) nueva propuesta de rotor. | 55 |

| | |
|--|----|
| 5.2. Patrones de flujo. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones no gaseadas; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor. | 57 |
| 5.3. Magnitudes de velocidad. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones de no gaseado; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor. | 63 |
| 5.4. Intensidad de turbulencia. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones no gaseadas; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor. | 65 |
| 5.5. Sección transversal en la que se realizaron los cálculos del número de bombeo. | 69 |
| 5.6. Perfiles radiales de la capacidad de bombeo tanto para una sola fase, así como para las diferentes condiciones de gasificación (10 LPM y 40 LPM): a) rotor estándar; b) rotor muescado; c) nuevo diseño de rotor. | 70 |
| 5.7. Número de bombeo para los diferentes rotores bajo diferentes condiciones de inyección de gas. | 72 |
| 5.8. Cinética de desgasificado para los tres impulsores empleados en este trabajo, a 600 rpm y ambas condiciones de gaseado: a) 10 LPM; b) 40 LPM. | 74 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| 2.1. Procesos industriales de tratamiento de aluminio. | 20 |
| 4.1. Dimensiones del modelo físico. | 43 |
| 4.2. Descripción del equipo para la realización de la técnica de PIV. . . . | 45 |
| 4.3. Condiciones experimentales utilizadas para la evaluación de los rotores. | 46 |
| 5.1. Número de bombeo y capacidades de bombeo en las direcciones radial y axial para todos los rotores bajo condiciones de gaseado y no gaseado. | 69 |

Resumen

En este trabajo se analizó experimentalmente la influencia del desempeño hidrodinámico de un nuevo rotor-inyector sobre la cinética de desgasificado en un modelo físico de agua para un sistema de refinación de aluminio. Este estudio explora como las características de la dinámica de fluidos producidas debido a las interacciones gas-líquido que generan estos rotores determinan la eficiencia en el proceso de desgasificado. El desempeño de un nuevo diseño de rotor-inyector fue comparado contra dos diseños comerciales ya existentes en la industria. El rendimiento de cada rotor se evaluó utilizando dos diferentes tasas de inyección de gas. La hidrodinámica del sistema se investigó en un modelo físico de agua bajo condiciones de operación de flujo similares a las que se encuentran en el proceso de desgasificación de aluminio fundido. La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) se utilizó para obtener los campos de velocidad, demostrando la influencia de la hidrodinámica sobre la cinética de desgasificado. De esta manera, se obtuvieron mediciones instantáneas del campo de flujo del líquido para condiciones gaseadas y no gaseadas. Teniendo en cuenta las dos condiciones de inyección de gas, se encontró que los patrones de flujo cambian drásticamente para todos los rotores evaluados. Por otra parte, los resultados del campo de flujo turbulento mostraron diferencias significativas bajo todas las condiciones de inyección de gas. Se pudo demostrar que las geometrías de los rotores-inyectores afectan significativamente la distribución y el nivel de la intensidad de turbulencia. Se encontró que el nuevo diseño de rotor presenta las intensidades de turbulencia más altas bajo altas condiciones de inyección de gas, así como también una mejor distribución de turbulencia a lo largo del contenedor. Lo anterior es debido a la forma asimétrica de su geometría en la parte inferior. Esto genera una tasa de ruptura de burbujas mayor que en el caso de los rotores comerciales, promoviendo de esta manera la formación de pequeñas burbujas de gas que se distribuyen de manera uniforme sobre toda la olla de desgasificado. Se encontró que en condiciones de alto gaseado la configuración del nuevo diseño de rotor promueve una aceleración en los tiempos de proceso, generando un mejor rendimiento en la cinética de desgasificación. Se pudo demostrar que los diferentes comportamientos hidrodinámicos generados por los rotores influyen fuertemente en la cinética y la eficiencia del proceso de desgasificación.

Motivación

La creciente demanda de piezas de aluminio de alta calidad se ha incrementado en las dos últimas décadas. El proceso de refinamiento del metal líquido es la parte más importante para obtener los resultados deseados. La técnica de rotor-inyector es la más utilizada a nivel industrial. Desde la década de los 80's se establecieron las bases cinéticas y termodinámicas del proceso, sin embargo, el estudio riguroso del efecto que puede causar la geometría del rotor sobre la dinámica de fluidos a lo largo del reactor es un campo pobremente explorado. Al poder comprender esta variable del proceso es posible aumentar su eficiencia y por lo tanto obtener mejoras sobre el proceso que impacten a nivel industrial.

Objetivos

Objetivos generales

- Diseñar una nueva geometría de rotor-inyector para el proceso de desgasificado de aluminio.
- Evaluar la influencia del desempeño hidrodinámico de una nueva propuesta de rotor-inyector sobre la cinética de desgasificado en un modelo físico de agua.

Objetivos particulares

- Diseñar y construir un sistema aire-agua que sea capaz de emular las condiciones de operación reales existentes en un proceso batch de desgasificado de aluminio en el cual se utilice el método de rotor-inyector.
- Diseñar un nuevo dispositivo de rotor-inyector el cual sea utilizado en el proceso de desgasificación de aluminio.
- Evaluar y comparar los parámetros hidrodinámicos de un nuevo diseño de rotor-inyector con dos diseños comerciales existentes, mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).
- Analizar la influencia de la hidrodinámica generada por el nuevo diseño de rotor-inyector sobre la cinética de desgasificado.

Hipótesis

La hidrodinámica de los procesos industriales, que se llevan a cabo en tanques agitados, se encuentra gobernada por la configuración geométrica de los agitadores utilizados. Esto determina en gran medida la eficiencia del proceso y la obtención de los productos deseados con la calidad adecuada. En el caso del desgasificado de aluminio, una geometría asimétrica del rotor-inyector diseñado es capaz de generar altas intensidades de turbulencia, las cuales generarán una alta tasa de ruptura de gas, produciendo con esto un aumento en el área de contacto entre las dos fases. Esta geometría asimétrica genera una buena circulación de las burbujas, lo cual aumenta los tiempos de residencia del gas, por lo que el diseño de un nuevo rotor mejora la eficiencia de la cinética de desgasificado de aluminio, respecto a rotores comerciales.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Economía del aluminio a nivel mundial

El mercado de los metales impacta la economía mundial principalmente por dos razones, la primera de ellas, es que son un producto intermedio entre la producción industrial y de construcción. Dicho comercio se encuentra en función del volumen y composición de la demanda mundial. La segunda razón es que en algunos países la producción de metales constituye un alto porcentaje de sus exportaciones, y las fluctuaciones en los precios tienen un impacto directo en la macroeconomía. El metal no ferroso más importante a nivel mundial es el aluminio. El aluminio es utilizado tanto en la industria aeroespacial, así como también como en otras áreas. Los grandes productores de aluminio se encuentran localizados en lugares donde la electricidad es abundante y barata. El principal productor de aluminio primario es la región de Europa Central y del Este, seguido de China, Europa del Oeste y Asia exceptuando a China. El reciclado forma una parte importante en la producción de aluminio, debido a que el proceso de reciclado consume menos energía que la producción de aluminio primario^[39].

1.2. Demanda mundial del aluminio

La distribución geográfica de la producción de bauxita, alúmina y aluminio ha cambiado considerablemente desde 1972. Comenzando con la bauxita, mientras que

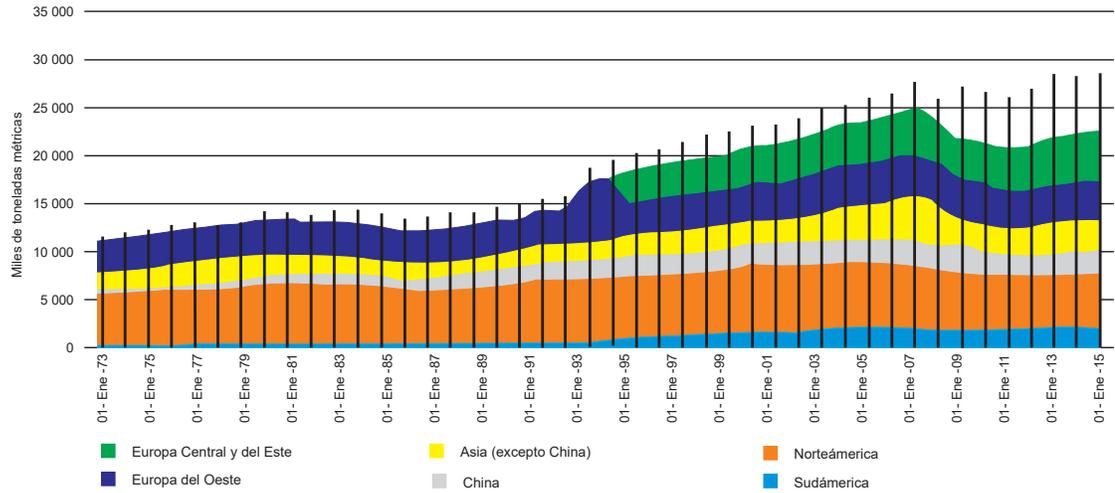


Figura 1.1: Producción Mundial de Aluminio, 2000-2016^[23].

Australia aumentó su participación en la producción mundial del 20% al 32% en los últimos 40 años, Jamaica, Surinam y Rusia ya no son los principales productores de bauxita. Actualmente los principales productores de aluminio primario son Europa Central y del Este (26%), Norteamérica (22%), China (15%) y Sudamérica (7%). El mercado combinado de los principales productores es alrededor del 70% de acuerdo con el Instituto Internacional de Aluminio. El consumo mundial de aluminio primario ha aumentado con una tasa de crecimiento anual combinada (CAGR, por sus siglas en inglés) de alrededor del 5% durante la última década, a pesar de dos recesiones y continuas amenazas del mercado de sustitutos. Durante este período, la tasa de crecimiento de la producción de aluminio se ha incrementado durante las últimas cuatro décadas y aparentemente no disminuirá en los siguientes años. Esto se ilustra mejor en la Figura 1.1, que presenta el uso del aluminio primario por regiones. Se ha previsto un crecimiento significativo en el consumo de aluminio para la producción de automóviles; hace unos años el metal fue utilizado para hacer piezas individuales, en los últimos años la tendencia es el uso del aluminio en prácticamente todos los vehículos. De acuerdo con el pronóstico de Ducker Worldwide, en 2025 aproximadamente el 20% de todos los vehículos tendrán un cuerpo completo de aluminio, en comparación con el 1% en la actualidad.

1.3. Importancia de la calidad metalúrgica de las piezas de aluminio

La industria del aluminio demanda cada vez un mayor control en la calidad de las piezas de aluminio. Además existen grandes esfuerzos por parte de la industria e investigadores para producir productos de alta calidad. Existen tres características importantes que definen la calidad del metal: el control de las trazas de elementos no deseados, la remoción de inclusiones no metálicas y la reducción del hidrógeno disuelto. Las inclusiones causan un aumento en los esfuerzos, y pueden causar la falla prematura de la pieza. Los óxidos son frecuentemente la causa más común de las inclusiones observadas en el aluminio líquido. Los óxidos se forman al momento de agregar piezas sólidas al aluminio fundido, esta capa de óxido flota en la superficie del metal líquido, causando la formación de inclusiones en las piezas terminadas. La presencia de porosidades formadas por el hidrógeno rechazado durante la solidificación, tiene efecto negativo en las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, principalmente sobre las propiedades de ductilidad y fatiga^[19,26,41].

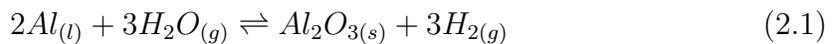
Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido

La solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido se incrementa con la temperatura de forma exponencial, sin embargo, en estado sólido presenta una solubilidad muy baja como se puede observar en la Figura 2.1, cuando el metal líquido solidifica el hidrógeno disuelto es rechazado causando porosidades en las piezas coladas causando una pobre calidad metalúrgica. Las porosidades aparecen debido al rechazo del gas desde la solución durante la solidificación y por la inhabilidad del metal líquido para compensar la contracción volumétrica asociada a la solidificación^[6,37,44].

El hidrógeno es el único gas capaz de disolverse en una cantidad apreciable en aluminio fundido, el dramático decremento de la solubilidad durante la solidificación permite la formación de porosidades las cuales reducen las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Varios autores han reportado el efecto de deterioro en función del gas contenido^[2,6,25,26,30,44]. Cuando se expone el metal líquido al vapor de agua se disocia en hidrógeno que se disuelve en forma atómica en el aluminio y el oxígeno forma parte de la escoria. La reacción se puede expresar de la siguiente forma^[14–16]:



Posteriormente el hidrógeno molecular se disocia de acuerdo a la siguiente reacción:

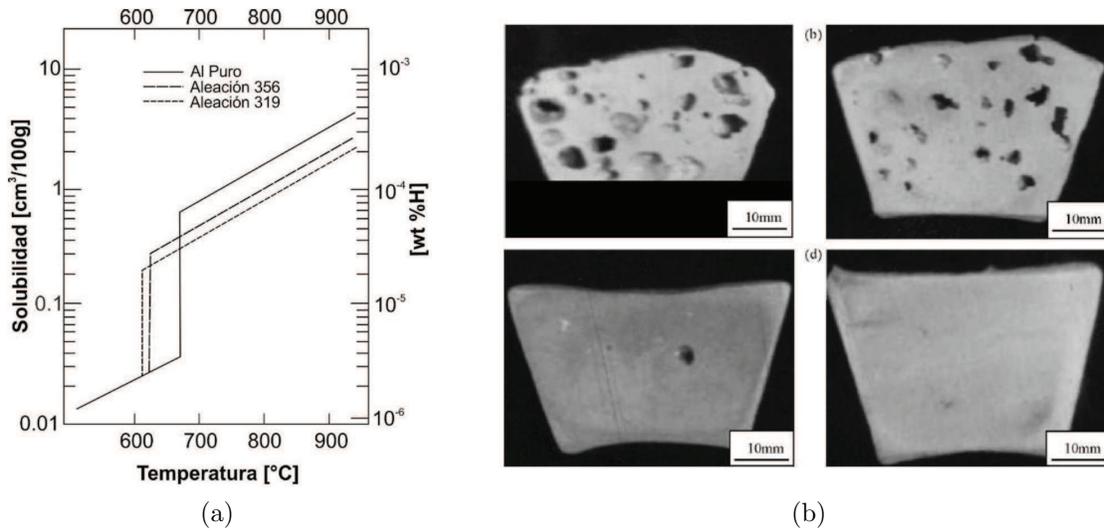


Figura 2.1: Solubilidad de hidrógeno en aluminio, a) diagrama de solubilidad de hidrógeno en aluminio líquido y algunas aleaciones en función de la temperatura^[29,49], b) piezas coladas de aluminio con diferentes niveles de desgasificado^[30].



En donde \underline{H} representa el hidrógeno atómico disuelto en el aluminio líquido. La disolución del hidrógeno atómico en aluminio (líquido o sólido) sigue la ley de Sieverts, lo que implica^[37]:

- La disociación del gas diatómico en su forma atómica sobre la interfaz gas-líquido;
- La disolución del hidrógeno atómico en la interfaz del metal fundido y
- Transporte del hidrógeno hacia el seno del metal por difusión

La Figura 2.2 describe la física involucrada en la absorción de hidrógeno en aluminio. La solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido ha sido descrita por Sievert^[40] a principios del siglo pasado, así como la técnica para estudiar el fenómeno físicamente, sin embargo, matemáticamente se logró la descripción de este fenómeno con los es-

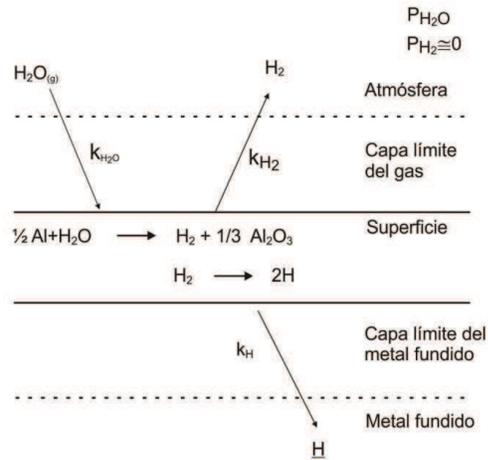


Figura 2.2: Mecanismo de formación de hidrógeno en aluminio líquido^[8].

tudios realizados por Ransley y Neufeld^[36] determinaron la solubilidad de hidrógeno y tanto en aluminio líquido como en sólido mediante las siguientes correlaciones:

$$\log \frac{S}{p^{0.5}} = -\frac{2760}{T} + 1.356 \quad (2.3)$$

$$\log \frac{S}{p^{0.5}} = -\frac{2080}{T} - 0.652 \quad (2.4)$$

donde S representa la solubilidad de hidrógeno en aluminio en ml/100g de Al, P es la presión de hidrógeno en mm de Hg, T es la temperatura absoluta en $^{\circ}\text{K}$ (Kelvin), en investigaciones posteriores se desarrollaron modelos de solubilidad para aleaciones de aluminio, una correlación que toma en cuenta más de un elemento aleante fue propuesta por Anyalebechi^[3,4] en donde se analizó el efecto de elementos aleantes en la solubilidad del hidrógeno en aleaciones de aluminio para sistemas Al- X , en donde $X = \text{Cu, Si, Mg, Zn, Li, Fe, Ti}$, a partir de datos reportados y mediante regresión multivariable obtuvieron la siguiente correlación:

$$\begin{aligned} \log S = & -1.066 - 3000.35 \left(\frac{1}{T} \right) - 0.0133(\text{wt \%Cu}) - 0.0085(\text{wt \%Si}) \\ & + 0.07257(\text{wt \%Mg}) - 0.00783(\text{wt \%Zn}) + 0.24267(\text{wt \%Li}) \end{aligned}$$

$$- 0.03398(\text{wt \%Fe}) + 0.04338(\text{wt \%Ti}) \quad (2.5)$$

2.2. Principales procesos de desgasificado del aluminio

El aluminio líquido es extremadamente reactivo cuando se encuentra en contacto con humedad: el agua se descompone para formar hidrógeno. Cantidades excesivas del gas disuelto han sido bien documentadas sobre la disminución de las propiedades mecánicas en el producto final. Por lo tanto los niveles de hidrógeno deben ser controlados para minimizar la cantidad de productos rechazados. Para controlar la cantidad de hidrógeno disuelto los fundidores deben controlar dos situaciones principalmente^[27]:

- Prevenir y minimizar la introducción de hidrógeno al metal fundido;
- Medir y remover el hidrógeno antes de colar el metal

2.2.1. Remoción del hidrógeno

La capacidad de desgasificar el aluminio se encuentra acompañada generalmente por el uso de un gas de purga, actualmente se introduce mediante una unidad de desgasificado rotatoria la cual consiste en un rotor fabricado en grafito mediante una flecha que puede ser hueca o sólida dependiendo del método de inyección del gas de purga. Este proceso está limitado por las leyes de la termodinámica y cinética química^[9,12], cuando las burbujas del gas de purga son introducidas al metal, coleccionan el hidrógeno llevándolas hacia la superficie^[43]. La situación ideal se da cuando las burbujas se saturan completamente de hidrógeno y reducen el nivel de hidrógeno contenido en el metal. En este caso la eficiencia del proceso es de 100% desde el punto de vista termodinámico. Pero el contenido de gas alcanza un equilibrio entre la presión parcial de hidrógeno y las burbujas del gas de purga, por lo que la cantidad de gas requerido para remover el hidrógeno restante se incrementa^[10,24,47]. Este comportamiento limita la habilidad de los fundidores para obtener niveles muy bajos de hidrógeno (alrededor de 0.1 cm³/100g) contenido en el aluminio. La desgasificación se lleva a cabo generalmente en una de tres áreas de la fundición^[42]:

- En la cuchara de transferencia, utilizada para transportar metal entre los hornos de fusión y de contención;
- En hornos de crisol, usualmente justo antes de que el aluminio fundido sea vaciado;
- En un sistema en línea, cuando el metal es transportado a los hornos de contención.

Las dos primeras opciones son las más comunes y la operación de desgasificación para ambos se lleva a cabo típicamente usando un desgasificador rotatorio del impulsor (RID). En términos prácticos, todos los desgasificadores rotativos no se crean iguales. Es importante tener un diseño de rotor óptimo para producir pequeñas burbujas altamente eficientes. Se pueden lograr ahorros significativos de costos a partir de tiempos de tratamiento más cortos y reducción del uso de gas. En el pasado, la industria de la fundición de metales ha utilizado diseños de rotores sencillos, que son menos costosos, pero producen burbujas más grandes. Este camino presenta una economía falsa debido a la reducida eficiencia^[48].

2.2.2. Métodos de remoción

Actualmente existen varios métodos para remover las impurezas en el aluminio líquido los cuales se pueden clasificar como gas de purga, tratamiento al vacío, filtración y sedimentación. De estos procesos solo dos son utilizados para la remoción de hidrógeno como se muestra en la Cuadro 2.1. Anteriormente se utilizaba el método de desgasificado al natural pero es ineficiente y se ha descontinuado su uso industrial.

A continuación se describen de manera breve algunos procesos industriales comerciales utilizados en el desgasificado de aluminio líquido.

Proceso IMN

Este proceso fue desarrollado por el Instituto Polaco de Metales no ferrosos en 1977. Es un tipo de proceso continuo de desgasificado. El hidrógeno es removido en la misma dirección del flujo de gas de purga. Las burbujas de gas son inyectadas mediante un tapón poroso por debajo del reactor. Se utiliza una mezcla de Ar/Cl₂ o

| Tratamiento del metal | Reactivo | Remueve |
|------------------------|---|--|
| Gas de purga | Cl ₂ , Ar, N | H ₂ , metales alcalinos, flotación de inclusiones |
| Cloración | Cl ₂ | Metales alcalinos, Mg |
| Vacío | – | Mg, Zn, Pb, H ₂ |
| Filtración | Espuma cerámica (Al ₂ O ₃) | Inclusiones (Al ₂ O ₃ , MgO, etc.) |
| Sedimentación | Tiempo | Inclusiones (Al ₂ O ₃ , MgO, etc.) |
| Tratamiento de escoria | NaCl, KCl | Inclusiones (Al ₂ O ₃ , MgO, etc) |

Cuadro 2.1: Procesos industriales de tratamiento de aluminio.

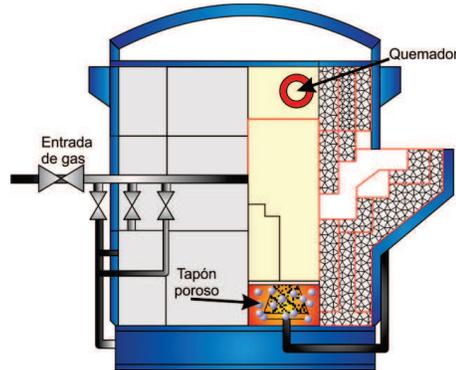


Figura 2.3: Diagrama de un reactor del proceso IMN.

N₂/Cl₂. Este proceso también remueve hasta un 70 % de inclusiones no metálicas^[50,51] (Figura 2.3).

Proceso de unidad de desgasificado rápido (Rapid Degassing Unit, RDU)

La compañía FOSECO inventó este proceso en 1986. Como se muestra en la Figura 2.4, la característica principal de este reactor es la implementación de un rotor, el cual tiene una doble función, la de bombear aluminio líquido desde el fondo del reactor, para crear un baño homogéneo y segundo crear burbujas de diámetros pequeños en el gas de purga. Este rotor genera grandes áreas de contacto entre el gas y el aluminio líquido. La vida promedio del rotor es de 6 semanas. Se utilizan mezclas

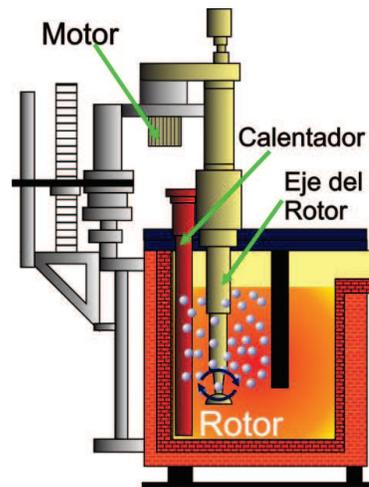


Figura 2.4: Esquema de la unidad de desgasificado RDU.

de argón o nitrógeno con cloro (2-5 %). La tendencia general en estos casos es que la eficiencia de remoción de hidrógeno disminuye con el incremento de la rapidez de flujo del metal líquido o la disminución de la rapidez de flujo del gas de purga^[50,51].

Proceso ALCOA 503

Este proceso fue inventado en 1978 por la empresa ALCOA. Una descripción del reactor se puede observar en la Figura 2.5. El elemento principal es el dispersor rotatorio de gas; estequiométricamente se requiere introducir Cl_2 por el centro del reactor, para obtener una gran cantidad de burbujas que se dispersan y ascienden a través de los dispersores. Experimentos a escala en modelos físicos aire-agua muestran que en la zona de reacción, el 50 % de las burbujas formadas son menores a 2 mm de diámetro y el 90 % de las burbujas son menores a 4 mm de diámetro aproximadamente. El flujo es en paralelo inicialmente y a contracorriente en las siguientes etapas, que se encuentran separados por tres baffles. El flujo de gas es típicamente una mezcla de cloro y argón, aunque se pueden utilizar otros gases. Un proceso mejorado llamado ALCOA 622 ha sido desarrollado. Este proceso utiliza una menor cantidad de Cl_2 ($\sim < 2\%$), y elimina la capa de sales fundidas. En este proceso se pueden llegar a obtener concentraciones de hidrógeno de 0.21 ppm y el 95 % de sodio

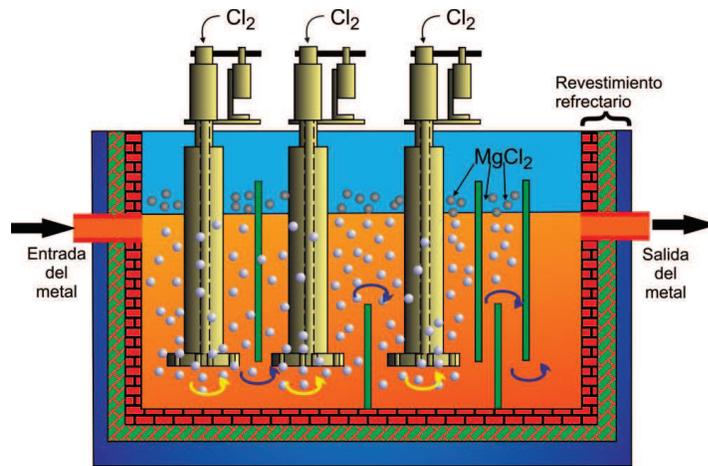


Figura 2.5: Diagrama del proceso ALCOA 503.

y calcio pueden ser removidos, hasta alcanzar un contenido final de 1 - 4 ppm. La dependencia de remoción de impurezas disminuye con el incremento de la rapidez de flujo del gas de purga, mientras que el aumento en la fracción de cloro favorece la remoción de estos elementos^[50,51].

Proceso de flotación con gas inerte por medio de boquilla giratoria (Proceso SNIF)

Este proceso se conoce como SNIF por sus siglas en inglés (Spinning Nozzle Inert Flotation Process). El proceso SNIF fue desarrollado en 1974 por la Union Carbide Corporation. La parte principal es la boquilla giratoria, que produce burbujas finas y las dispersa uniformemente en el baño líquido (Figura 2.6). Además, provee una agitación intensa y un patrón de flujo favorable en el horno. El diámetro promedio de burbuja obtenido es de 5 mm y solo se utiliza un máximo de cloro de 5 % en la mezcla de gases. Durante el proceso, el flujo de sales puede ser adicionado en el reactor con un flujo máximo de 0.001 % de la rapidez de flujo del gas. Se puede alcanzar concentraciones de hidrógeno de 0.06 - 0.07 ppm. En sodio se pueden alcanzar niveles de 0.1 - 3 ppm. Todas las inclusiones se pueden recolectar, permitiendo una remoción de 95 %. La eficiencia de la remoción de hidrógeno depende de rapidez de flujo del

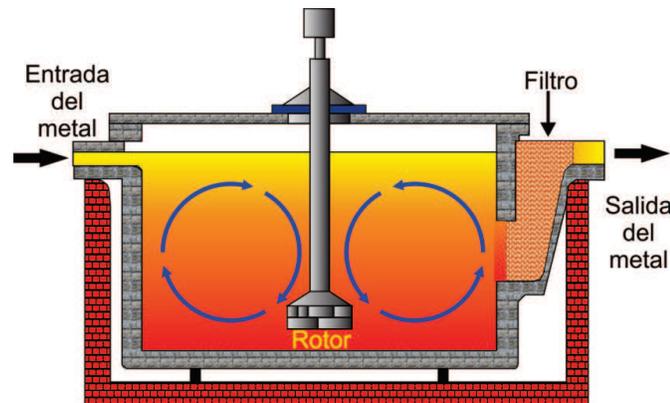


Figura 2.6: Diagrama de un reactor para el proceso SNIF.

gas de purga y del metal líquido alcanzando un 90 % de eficiencia de remoción de hidrógeno. El proceso SNIF puede tener varias cámaras y cada una puede tener su boquilla independiente. En Japón el proceso SNIF ha sido mejorado al llamado SNIF PHD-50 (de tipo móvil) y el SNIF HF 2000 (de tipo fijo)^[50,51].

Proceso MINT

El gas es inyectado a altas velocidades dentro del líquido genera pequeñas burbujas en movimiento desplazándose a gran velocidad sin la necesidad de partes giratorias (Figura 2.7). El diámetro promedio de burbuja depende del número de Reynolds del orificio. Cuando se alcanza un valor de Reynolds de aproximadamente 10,000, se obtiene un diámetro de burbuja de alrededor de 5 mm sin importar el tamaño del orificio. Se utiliza una mezcla de gases con cloro en una proporción de 0.5-3.0 %. La eficiencia de remoción de hidrógeno es de aproximadamente de 75 % y se alcanzan niveles de hidrógeno de 0.05 ppm. La eficiencia de remoción de sodio es de alrededor de 80 % alcanzando concentraciones menores a 2 ppm. El litio tiene una eficiencia de 75 % y una concentración de 0.7 ppm. El calcio se puede disminuir hasta una concentración de 1.7 ppm con una eficiencia de 60 %. La eficiencia de remoción de hidrógeno depende de la rapidez de flujo del gas de purga y de la rapidez de flujo del metal. En Polonia se desarrolló un proceso similar llamado URC-7000^[50,51].

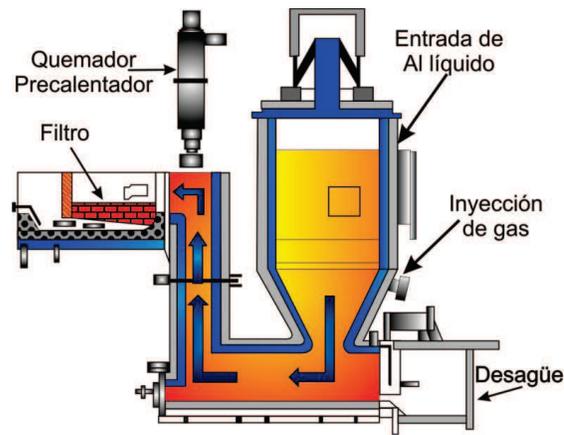


Figura 2.7: Diagrama del proceso MINT.

Proceso de desgasificado Compact Alcan

El proceso ACD (Alcan Compact Degasser), fue desarrollado por la empresa Alcan International Ltd. en 1995. Consiste en una serie de desgasificadores arreglados en línea (Figura 2.8). El argón forma burbujas y se eleva dentro del baño eliminando el hidrógeno disuelto. Los rotores están separados por baffles verticales que dividen al reactor en diferentes secciones. El desgasificador puede generar burbujas muy pequeñas. La eficiencia de desgasificado es de 55 - 60 % de remoción de hidrógeno. Y para metales alcalinos es de 70 % aproximadamente^[50,51].

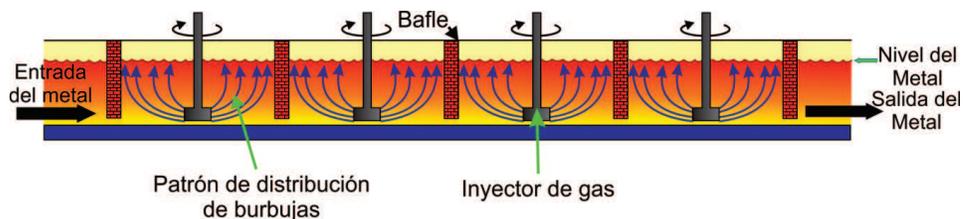


Figura 2.8: Proceso Alcan Compact Degasser.

2.3. Uso de rotores en la industria del aluminio

El refinamiento es la etapa más importante en el tratamiento del metal líquido, para esto se requiere que la concentración de hidrógeno y burbujas sea homogénea en todo el reactor, para esto, se han diseñado rotores de diferentes geometrías y son utilizados industrialmente tratando de reducir los tiempos de desgasificado, sin embargo, a causa de la complejidad del fenómeno, no se ha establecido una teoría que permita el diseño óptimo de un rotor para un sistema como lo menciona Tatterson en 1991^[45,46]; por lo que el diseño de rotores se basa en reglas ingenieriles. Frecuentemente el proceso de mezclado no es bien entendido^[17]. En este caso es necesario conocer los patrones de flujo mediante observaciones experimentales y su determinación tanto cualitativamente como cuantitativamente^[31,32,33]. La mecánica de fluidos domina el transporte de material a lo largo del tanque, mientras que la geometría determina en parte la dinámica de fluidos. Los tanques de mezclado y rotores se pueden encontrar en diferentes formas y tamaños, sin embargo, no fue hasta la época de los años 60 que se estableció una geometría estándar. La Figura 2.9 muestra un tanque de mezclado en régimen turbulento y los diferentes parámetros geométricos que lo definen, donde T es el diámetro del tanque, D es el diámetro del rotor, W el ancho, C el claro del rotor, y B es el ancho del baffle.

Esta configuración puede ser vista como un punto de referencia para ser escalado en estudios posteriores. La determinación de la mejor geometría es principalmente función del proceso que se lleve a cabo. El número de Reynolds de un rotor se basa en la velocidad de la flecha y en el diámetro del rotor. En la Figura 2.9 se muestra un tanque con unos dispositivos denominados baffles. Los baffles son placas colocadas en la trayectoria del fluido para perturbar o redireccionar el flujo. Lo más común es expresar el ancho de estos en un porcentaje del diámetro del tanque. Existen otras configuraciones de baffles que se colocan en el fondo del tanque, baffles flotantes, circulares que se colocan en la flecha del rotor. Sin embargo, los baffles en paredes han sido muy estudiados, estos maximizan la potencia de entrada al fluido y minimizan la rotación de cuerpo sólido dentro del tanque, situación que no promueve el mezclado. A altas velocidades de rotación, se forma un vórtice en el centro del fluido debido a las fuerzas centrífugas que se generan enviando el fluido hacia las paredes. En algunos casos la superficie del vórtice alcanza al rotor, causando entrada de aire. Los baffles

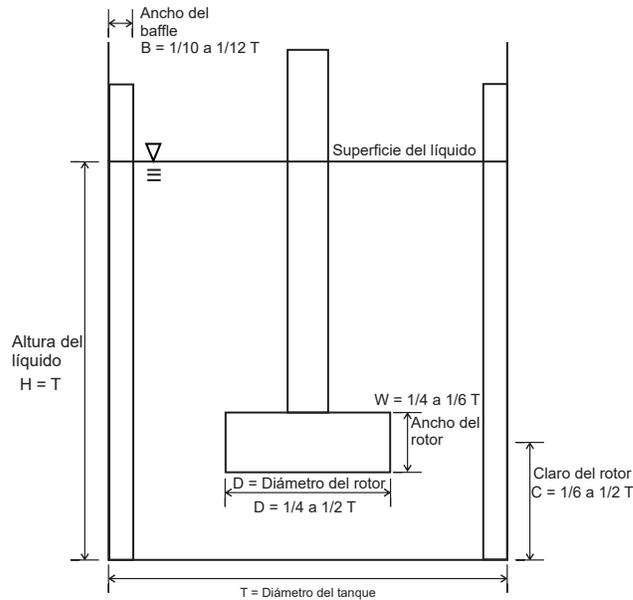


Figura 2.9: Esquema de un tanque de agitación con rotor-inyector, se muestran los diferentes parámetros geométricos que deben considerarse en esta configuración^[45].

de superficie y pared son utilizados en la reducción del vórtice^[45,46].

2.4. Uso de rotores comerciales

Los rotores se clasifican principalmente de acuerdo al régimen de mezclado en laminares y turbulentos. El rotor es el encargado de transportar el fluido a través de todo el tanque. Para buenos resultados el rotor debe de transportar la cantidad de movimiento a largo de las tres dimensiones del reactor. Comúnmente los rotores tienen dimensiones que van desde un cuarto hasta un medio del diámetro del reactor. Hixson y Baum en 1942, dieron otra clasificación de estos sistemas con base en el régimen turbulento en rotores de flujo axial y radial. En la Figura 2.10 se muestra una descripción de los patrones de flujo.

El uso de rotores en la industria del aluminio se ha dado desde hace 40 años, sin embargo, la mayoría de estos diseños son de uso comercial y frecuentemente no se provee de información científica que avale el desempeño de cada uno de estos productos como se puede observar en la Figura 2.11 y Figura 2.12 existen diversas

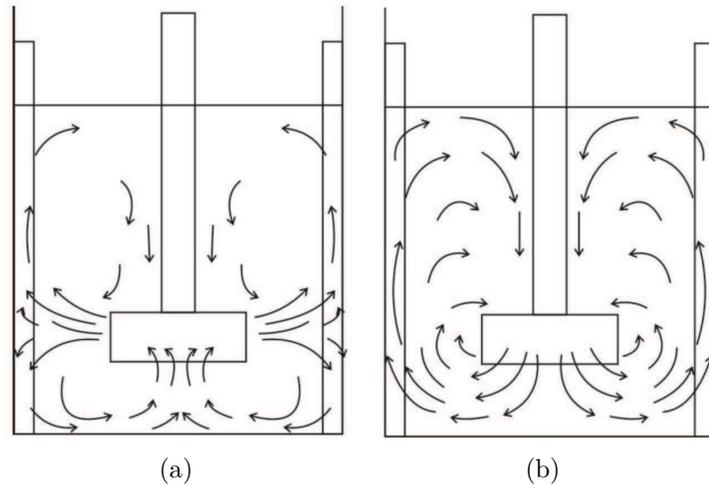


Figura 2.10: Rotores turbulentos: a) patrones de flujo para rotores radiales; b) patrones de flujo para rotores axiales^[45].

geometrías para el proceso de desgasificado de aluminio, algunas características principales son el material de fabricación que consiste en grafito, en general tienen un espesor considerable y finalmente tienen muescas sobre la superficie del rotor para aumentar el área de contacto entre el sólido y el fluido. El estudio riguroso de rotores tiene alrededor de cuatro décadas de investigación, y es de mencionar que solo unos cuantos autores tales como Chen^[11], Dantzing^[13] y Sigworth^[41–43] por mencionar algunos, reportan el uso de rotores de grafito en aluminio líquido, debido a la complejidad del proceso por las altas temperaturas de trabajo y la opacidad del metal líquido. Para estudiar la dinámica de fluidos se utilizan modelos físicos que representan el modelo real en donde existe una vasta literatura, sobre el tema Saternus^[38] ha estudiado diferentes tipos de geometrías en el reactor URO-200 que fue diseñado en el Instituto de Metales No-ferrosos de Polonia, los rotores estudiados se muestran en la Figura 2.11, en donde analiza el desempeño en base a la distribución de burbujas causadas por las diferentes geometrías. Los rotores comerciales más utilizados en la industria del aluminio son los provistos por la empresa FOSECO, la Figura 2.12 muestra los diseños patentados por la empresa en donde el rotor denominado FDU XRS es el de mejor desempeño para realizar el proceso de desgasificado en aluminio líquido.

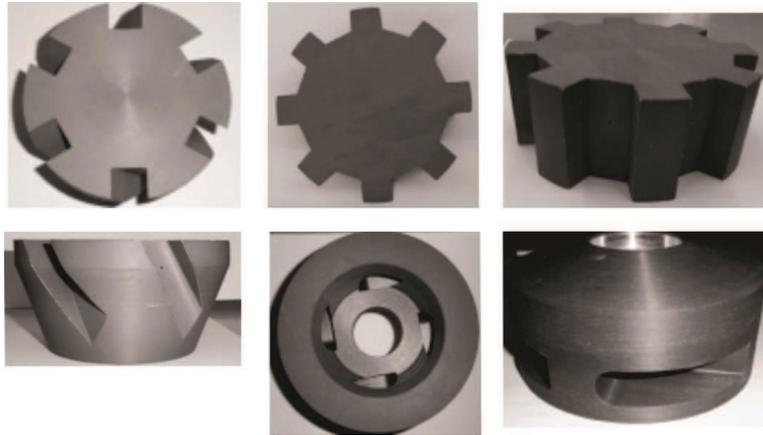


Figura 2.11: Rotores utilizados por Saturnus, para el análisis de la desgasificación del aluminio líquido^[38].

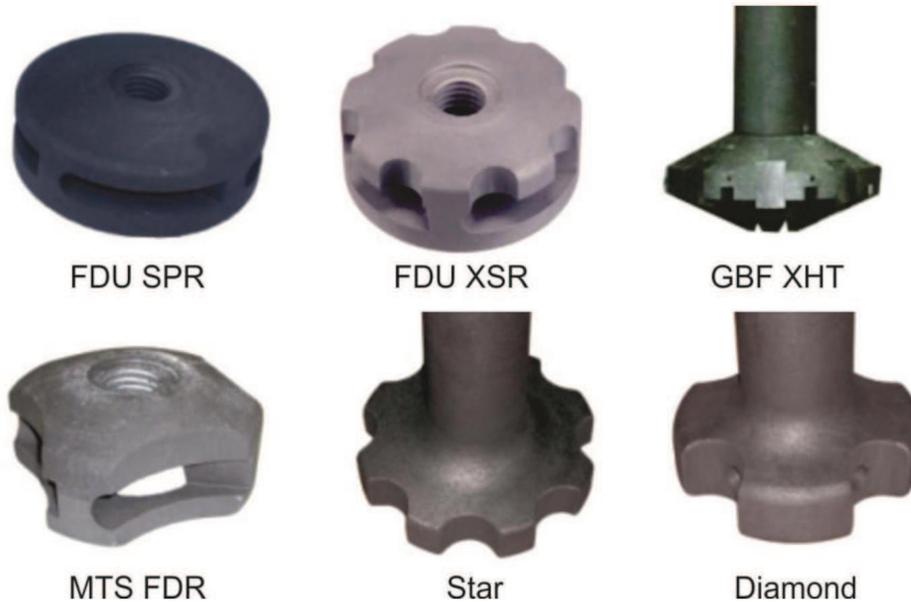


Figura 2.12: Rotores comerciales utilizados industrialmente desarrollados por la empresa FOSECOTM [7].

La empresa FOSECO fabrica dos tipos de rotores; el primer grupo consiste en un rotor-flecha de una sola pieza como se puede observar en los rotores designados Star y Diamond, el principal problema es el desgaste heterogéneo, ya que si algunas de las secciones llegan a desgastarse a diferente rapidez es necesario cambiar la pieza por completo. La ventaja de este producto es evitar las fugas que pudiese tener entre la flecha y cuerda del rotor, por otra parte el grupo en donde solo se comercializa el rotor como los denominados FDU SPR, FDU XSR, GBF XHT y MTS FDR, solo es necesario cambiar la flecha o el rotor en caso de un desgaste diferente entre las piezas. Sin embargo, al ser productos patentados solo se cuenta con la información que el fabricante proporciona en forma de notas técnicas y de ventas sin ninguna validación por parte de ellos.

Capítulo 3

Fundamentos

3.1. Modelado físico de procesos industriales

Un modelo físico es una representación concreta de un proceso real, cambiando los materiales, y la escala de operación. Los modelos físicos son más pequeños, baratos, de fácil manejo, y más simples que un proceso real, sin embargo los principales aspectos del problema son considerados. Adicionalmente, las condiciones de entrada del proceso pueden ser controladas y sistemáticamente variadas, mientras que en un proceso real no se tiene este control. Los modelos físicos deben de cumplir ciertos criterios de similitud entre los cuales se encuentran la similitud geométrica, cinemática y dinámica por mencionar algunos. Los modelos físicos permiten describir, explicar y entender un proceso cuando no es posible trabajar directamente con el proceso que se desea estudiar ^[5,23,28].

Se han realizado muchos estudios sobre el concepto de similitud, pero existen diferentes maneras de enunciar la similitud de un proceso. A continuación se listan algunas de las similitudes que pueden existir entre procesos.

3.1.1. Similitud general de procesos

La similitud entre dos procesos existe cuando cumplen con los mismos objetivos del proceso mediante el mismo mecanismo y producen el mismo producto para ciertas especificaciones. El escalamiento, rapidez de producción, equipo utilizado, geometría,

y todos los demás factores no son necesarios para tener similitud del proceso. La similitud de procesos es el último objetivo en el escalamiento de procesos donde la similitud geométrica solamente es un referente.

3.1.2. Niveles de similitud

Escalamiento y diseño de procesos puede incluir simplemente la misma geometría y velocidades de flujo. Un alto nivel de similitud requiere las mismas escalas de rapidez de disipación de energía, geometría y velocidades de flujo. Otro nivel de requiere las mismas condiciones de frontera e iniciales tanto como sea posible. Una similitud completa requiere que sea matemática y fenomenológicamente idénticos.

En otro tipo de procesos también debe tomarse en consideración otras relaciones de similitud, como son la térmica y química, para el caso concreto de nuestro sistema, el cual se considera en estado estacionario y isotérmico, dichas similitudes no se consideran a lo largo de este trabajo.

En la industria metalúrgica, los modelos físicos son una herramienta utilizada ampliamente con la que se pueden obtener datos aproximados a la realidad, sobre lo que ocurre dentro de los reactores de procesos, dichos datos pueden dar una idea representativa de lo que ocurre en procesos industriales reales. Con estos modelos se busca, entender los fenómenos de transferencia de masa y momento, con lo que se busca realizar un escalamiento, predicción y diseño del sistema industrial deseado. Uno de los aspectos más importantes en la utilización de modelos físicos de agua para emular las condiciones de operación en procesos de desgasificado de aluminio, es el que se refiere a la seguridad en su utilización y bajo costo, lo anterior debido a las condiciones extremas de temperatura, utilizadas en la purificación de aluminio líquido, además del ahorro en costo que presenta al utilizar agua como fluido modelo. Lo anterior aunado al hecho de la fácil manipulación de los modelos, tanto en transporte como en fabricación. En este trabajo se realizó la modelación física a escala completa (1:1) entre el modelo industrial y el modelo físico, esto debido a la amplia variedad de parámetros de trabajo utilizadas en operaciones industriales de desgasificado de aluminio, consideramos que esta sería la manera más viable de limitar el número de variables a considerar en el proceso, observando así únicamente las similitudes geométricas, dinámicas y cinemáticas del sistema.

3.1.3. Similitud geométrica

El criterio de similitud geométrica se refiere a la forma. Dos sistemas son geométricamente similares cuando para cualquier longitud en un sistema corresponde a la longitud de otro sistema existe una razón (o proporción) denominada factor de escala. La similitud geométrica es utilizada por conveniencia y reduce el trabajo requerido, por referirse a la forma es más que evidente que es el principal criterio de similitud, en ocasiones no es posible realizar el modelo a escala por lo cual se utilizan modelos denominados distorsionados. Matemáticamente las longitudes se expresan mediante la expresión:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_r} \quad (3.1)$$

Para áreas

$$\lambda_L = \frac{A_m}{A_r} = \frac{L_m^2}{L_r^2} \quad (3.2)$$

En donde L_m , L_r , representan las longitudes características tanto del modelo (m), así como del reactor industrial (r), y donde A_m y A_r , representan el área característica del modelo como del reactor, respectivamente.

3.1.4. Similitud cinemática

La similitud cinemática representa la similitud del movimiento, requiere que el modelo y el reactor tengan la misma razón de longitud y tiempo, entonces la proporción de velocidad será la misma para ambos. La equivalencia en escala implica solamente la similitud geométrica, pero la equivalencia temporal requiere consideraciones dinámicas adicionales como la equivalencia de números de Reynolds y Match. La similitud cinemática existe entre el modelo y el reactor si:

- Las trayectorias de las partículas son geoméricamente similares.
- Si las razones de las velocidades de las partículas son similares.

En las siguientes ecuaciones los subíndices m y r , se refieren tanto al modelo, como al reactor, respectivamente.

Para velocidad

$$\frac{v_m}{v_r} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_r}{T_r}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_v \quad (3.3)$$

Para aceleración

$$\frac{a_m}{a_r} = \frac{\frac{L_m}{T_m^2}}{\frac{L_r}{T_r^2}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T^2} = \lambda_a \quad (3.4)$$

Caudal

$$\frac{Q_m}{Q_r} = \frac{\frac{L_m^3}{T_m}}{\frac{L_r^3}{T_r}} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_T} = \lambda_Q \quad (3.5)$$

En estas ecuaciones la velocidad, aceleración y el flujo volumétrico, se encuentran representadas por medio de v , a y Q , respectivamente.

3.1.5. Similitud dinámica

La similitud dinámica existe entre sistemas geométricos y cinemáticamente similares, si las razones de todas las fuerzas del modelo y reactor son las mismas. La similitud dinámica se enfoca en comparar las fuerzas que puedan acelerar o retardar el flujo de un fluido respecto a una propiedad del fluido. Frecuentemente se puede expresar como números o grupos de números adimensionales. Matemáticamente se puede expresar como:

Razón de fuerzas

$$\frac{F_m}{F_r} = \frac{M_m a_m}{M_r a_r} = \left(\frac{\rho_m L_m^3}{\rho_r L_r^3} \right) \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_T^2} \right) = \lambda_\rho \lambda_L^2 \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_T} \right)^2 = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_v^2 \quad (3.6)$$

Aquí, M , representa la masa, ρ , representa la densidad

Otra forma de expresar la similitud dinámica, requiere que se mantengan las siguientes relaciones en espacio y tiempo.

$$\frac{F_{I,m}}{F_{I,r}} = \frac{F_{P,m}}{F_{P,r}} = \frac{F_{v,m}}{F_{v,r}} = \frac{F_{g,m}}{F_{g,r}} \quad (3.7)$$

Es decir que la razón de fuerzas inerciales (I), de presión (P), viscosas (v) y gravitacionales (g) sean iguales, en donde L representa la longitud característica.

Reordenando la ecuación anterior se obtienen las siguientes relaciones:

$$\left(\frac{F_I}{F_v}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_v}\right)_r \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{F_I}{F_g}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_g}\right)_r \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{F_I}{F_\rho}\right)_m = \left(\frac{F_I}{F_\rho}\right)_r \quad (3.10)$$

Las relaciones anteriores representan varios números o grupos de números adimensionales. La similitud dinámica entre el modelo y el reactor se puede establecer mediante estos grupo de números.

Los números adimensionales encontrados por medio de las relaciones anteriores, representan y definen el balance entre fuerzas que caracterizan completamente la hidrodinámica del sistema

3.2. Números adimensionales

Para un flujo isotérmico de rotor – inyector como el analizado en este trabajo, se utilizan los siguientes números adimensionales:

$$(Re)_m = (Re)_r \quad (3.11)$$

$$(Fr)_m = (Fr)_r \quad (3.12)$$

$$(We)_m = (We)_r \quad (3.13)$$

Las ecuaciones 3.2, 3.2 y 3.2 se conocen como el número adimensional de Reynolds, Froude y Weber respectivamente, lo subíndices m y r corresponden al modelo

y reactor respectivamente. El criterio de similitud dinámica se puede formular en base a los números de Reynolds y Froude como se muestra en las ecuaciones 3.2 y 3.2, al igualar el número de Reynolds, implica la velocidad y tiempo varia con una relación de λ . En contraste, la similitud del número de Froude conlleva una dependencia de la velocidad en una proporción de $\sqrt{\lambda}$.

3.2.1. Número de Reynolds

El número de Reynolds se interpreta como la relación que existe entre las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas viscosas y se define para sistemas agitados mediante la siguiente ecuación:

$$Re_{rot} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (3.14)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, N es la velocidad de rotación, D es el diámetro del rotor y μ es la viscosidad cinemática. Dicho número frecuentemente se conoce como número de Reynolds del rotor. En sistemas agitados se distinguen tres regiones de flujo, laminar, transición y turbulento.

3.2.2. Número de Froude

El número de Froude relaciona las fuerzas inerciales respecto a las fuerzas gravitacionales. Para sistemas agitados se pueden encontrar distintas formas del número de Froude. Todas estas variantes del número de Froude incluyen las fuerzas gravitacionales y se utilizan para cuantificar el efecto superficial, y para el rotor se encuentra definido de la siguiente manera:

$$Fr_{rot} = \frac{N^2 D}{g} \quad (3.15)$$

3.2.3. Número de Weber

El número de Weber representa la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas superficiales, representadas por la tensión superficial. Para sistemas agitados el número de Weber se define:

$$We_{rot} = \frac{\rho N^2 D^3}{\sigma} \quad (3.16)$$

En general estos tres números relacionan las fuerzas inerciales respecto a una fuerza de oposición, sean estas de viscosidad, gravedad o tensión superficial. Si bien existen una gran cantidad de números o grupos adimensionales que son necesarios para describir sistemas agitados en dos fases, estos tres números son los más importantes para describir sistemas con rotor - inyector.

3.3. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

La visualización de flujo es una herramienta ampliamente utilizada en investigaciones relacionadas con la mecánica de fluidos de procesos industriales, ésta nos permite conocer los parámetros hidrodinámicos más relevantes en un proceso e identificar las principales variables del sistema. Esta técnica nos permite obtener un entendimiento básico de la física involucrada en dichos sistemas. Existen diversas técnicas ópticas no invasivas de visualización, en este trabajo se utilizó la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) por medio de la cual se obtuvo la caracterización completa del campo de velocidades. Esta técnica nos permite obtener información cuantitativa de las propiedades del flujo. La teoría y práctica asociada a esta técnica se discute a continuación^[1].

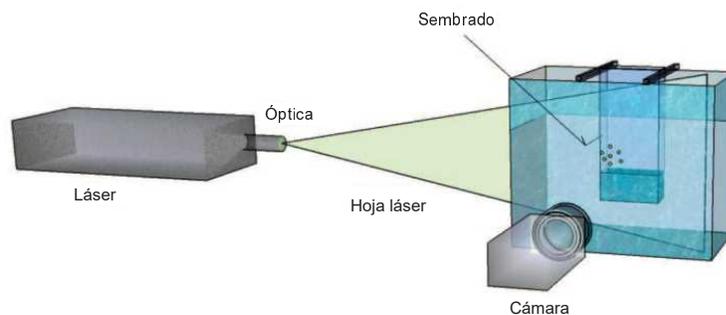


Figura 3.1: Configuración típica de un sistema de adquisición de velocimetría por imágenes de partículas.

La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), realiza la medición

indirecta de los campos de velocidad en un fluido, esto por medio del seguimiento de partículas trazadoras que han sido agregadas al flujo. Estas partículas son inertes y no interactúan con el flujo. La velocidad de desplazamiento de estas partículas se mide de manera simultánea en todo el campo de flujo. La medición está basada en el conocimiento del desplazamiento de las partículas en cada una de las imágenes obtenidas. El conocimiento del desplazamiento y tiempo entre cada par de imágenes nos permite calcular la velocidad local de las partículas, obteniéndose de esta manera un mapa vectorial del campo. De manera típica un sistema de velocimetría básico consiste en varios elementos, entre los cuales se encuentran, partículas trazadoras, una fuente de luz, un sistema de adquisición de imágenes; una cámara de alta velocidad y un *software* de adquisición y procesamiento (ver Figura 3.1).

El proceso de adquisición de datos y procesamiento de datos puede ser dividido de la siguiente manera:

1. El flujo es sembrado con pequeñas partículas trazadoras neutras, las cuales siguen el movimiento del fluido. La selección del tipo de partícula debe ser cuidadosa.
2. El área de interés en el cual se harán las mediciones es iluminado dentro del flujo con una hoja láser pulsante.
3. Las imágenes son capturadas a una resolución que nos permitirá un factor adecuado de escalamiento objeto-imagen.
4. Las imágenes son analizadas dividiendo cada una de ellas en pequeñas “áreas de interrogación” y calculando un vector de velocidad por cada una de las áreas.
5. Los resultados son post-procesados para obtener un mapa vectorial del plano de medición y remover los errores sistemáticos, el ruido y vectores erróneos.

Cada una de estas etapas se detalla a continuación.

3.3.1. Iluminación

Dado el contraste entre el tamaño de partículas empleadas y la demanda de una fuente de luz adecuada, se debe encontrar la relación apropiada entre ellos. Usual-

mente en flujos en los cuales se emplean partículas grandes, es aceptable una fuente con baja intensidad de luz, mientras que cuando se utilizan partículas trazadoras pequeñas es necesario emplear fuentes de luz con alta intensidad. Debido a que la iluminación y el sembrado de partículas están fuertemente relacionadas, podemos decir que el intervalo de iluminación y el rango de velocidad de flujo debe ser tal que el sembrado de partículas se encuentre en el rango de 2-20 diámetros de partículas. Por esta razón, el tiempo entre los pulsos láser debe ser adaptado. El tiempo de separación entre pulsos de láser, Δt , es una de las variables más importantes en el sistema PIV, ya que esta determina el rango de velocidades que se pueden medir en un determinado sistema. En nuestro caso de estudio, en el cual se tiene un flujo turbulento, fue necesario disminuir el tiempo entre pulsos considerablemente; de otra manera no se tendría un seguimiento correcto de las partículas y estas saldrían del área de interrogación correspondiente, por lo que no se lograría una correlación adecuada de los datos. La duración del pulso del láser determina el grado en el cual una imagen estará “congelada” durante la exposición al pulso. El programador de tiempo y el generador de secuencias son necesarios para la sincronización entre la generación del pulso láser y la adquisición de las imágenes. La fuente de luz que genera la hoja de luz pulsante láser en este caso es del tipo Nd:YAG, este tipo de láser genera pulsos de luz de alta intensidad de corta duración.

3.3.2. Adquisición de imágenes

En la captura de imágenes, la cámara adquiere la luz que es reflejada por las partículas iluminadas por una hoja láser. Las imágenes que se utilizan en esta técnica pueden ser capturadas por fotografía convencional, videograbación o por el uso de una cámara CCD (charged-coupled device). La cámara debe estar posicionada de manera perpendicular (90°) a la hoja láser. La resolución espacial es de crucial importancia para la aplicación correcta de esta técnica. Por lo que para la implementación del PIV en flujos turbulentos se requiere de una alta resolución espacial. La adquisición de las imágenes puede llevarse a cabo por medio de dos métodos: singleframe/multi-exposure o multi-frame/single exposure (Figura 3.2). El método de single frame/multiexposure tiene ciertas desventajas, en este método no se conserva información sobre el orden temporal de los pulsos iluminados, con lo cual surgen

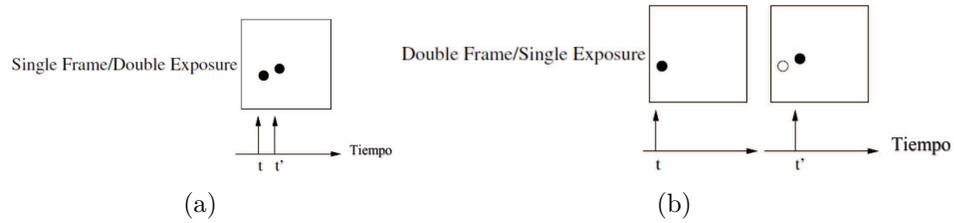


Figura 3.2: Descripción de las diferentes técnicas de adquisición de imágenes^[1].

ambigüedades en el desplazamiento del vector calculado. Por otro lado el método multiframe/single exposure de manera inherentemente conserva el orden temporal de las imágenes de las partículas captadas. La hoja de luz láser pulsante y la cámara están sincronizadas de tal manera que la posición de las partículas en el pulso de láser 1 están grabadas en el cuadro A de la cámara, y la posición de las partículas desde el pulso 2 están grabadas en el cuadro B, la correlación de las partículas se realiza entre los cuadros A y B. El método multi-frame/single exposure PIV y una cámara CCD son los recomendados para la realización de nuestro análisis, debido a la naturaleza del flujo bajo estudio, esto para evitar ambigüedad en la detección de las partículas y hacer más corto el tiempo entre los pulsos láser.

3.3.3. Análisis de imágenes

El análisis de las imágenes es una de las etapas más importantes en la implementación de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). A diferencia de lo que generalmente se piensa, el análisis que se realizará con esta técnica no consiste en seguir el comportamiento individual de las partículas. En realidad, la concentración de partículas es demasiado alta como para resolver el movimiento de cada partícula de manera individual, por lo tanto el método de seguimiento de partículas no puede ser utilizado para seguir a cada una de ellas. Por esta razón, el análisis estadístico se hace definiendo diferentes secciones, estas secciones son pequeñas áreas rectangulares que se han trazado sobre el campo de flujo, de esta manera se genera una malla sobre la cual se calcularán los vectores de velocidad. Estas pequeñas regiones se conocen como “áreas de interrogación”, para cada área de interrogación la

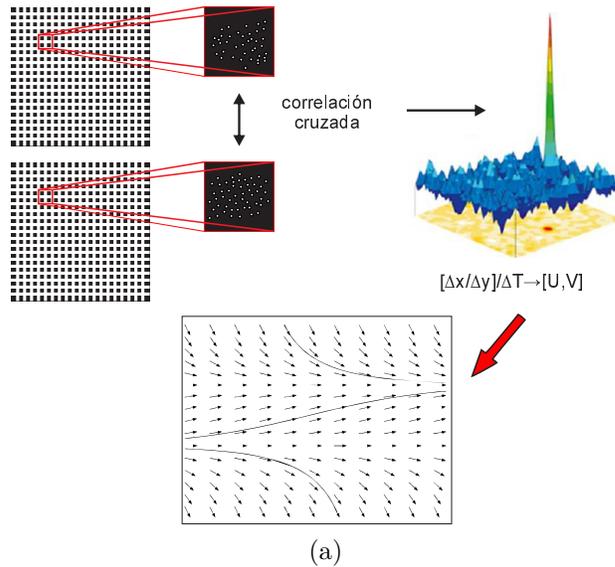


Figura 3.3: Obtención del vector de velocidad extraída de la correlación de dos imágenes^[1].

imagen entre el primer y segundo pulso de la hoja de luz están correlacionadas y producen un vector de desplazamiento promedio de las partículas. Dividiendo esto entre el tiempo entre pulsos, un vector de velocidad promedio puede ser calculado. Típicamente las áreas de interrogación sobre las cuales se realiza la correlación en mediciones de velocimetría son de 32×32 píxeles sobre una imagen digitalizada de alta resolución (1024×1024 píxeles). Así también, de manera general, dichas áreas se traslapan en un 50 %, de esta manera se obtiene una alta densidad de vectores de velocidad. Las imágenes se evalúan por medio de una correlación cruzada simple (Figura 3.3). Para obtener una alta confiabilidad sobre la validez de la correlación de las imágenes se requiere que en cada área de interrogación se pueda detectar una cantidad suficiente de partículas. Una de las grandes ventajas de este método de visualización, es que se trata de una técnica de medición instantánea, por lo que toda la información del campo de flujo se adquiere al mismo instante, con lo que se puede obtener un muestreo estadístico completo.

3.3.4. Post-procesado

Dada la enorme cantidad de datos que usualmente son recolectados, un rápido y automatizado método de post-procesamiento de los datos es necesario. El post-procesamiento está basado en procesos estadísticos. Para detectar y eliminar vectores erróneos, los datos del campo de flujo tienen que ser validados. Se han descrito en la literatura diferentes métodos para obtener la validación de los datos obtenidos; algunas de ellos incluyen un operador de histogramas, un operador dinámico del valor medio, una taza de picos altos, y la validación de rangos de velocidad. El propósito de dicha validación es detectar y remover los vectores que están fuera de estos rangos y usando técnicas de interpolación y extrapolación, de esta manera se substituirá a aquellos vectores que fueron rechazados. El nuevo valor que adoptaran estos vectores substituidos, se calculará a partir de los vectores de velocidad que se encuentran a los alrededores de cada uno de ellos. Esta substitución de valores en el mapa vectorial tiene un efecto similar a filtrar la señal adquirida, de la cual se extraen los datos que se encuentran fuera de rango, los cuales pueden deberse a una falta de correlación de los datos, brillos en la imagen o a aberraciones ópticas detectadas al momento de la medición. Los métodos de validación pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

1. Validación de un punto simple. El cual evalúa la validez de cada vector individual (ej. se revisa si el vector está en un cierto rango de velocidad), y
2. Validación del campo total de flujo. Esta validación se lleva a cabo con la evaluación de todos los vectores en un mapa o en una pequeña región por comparación de cada vector con los vectores vecinos y analizando la diferencia.

Así también la validación puede realizarse por medio de una combinación de ambos métodos o como una secuencia de ellos. Es recomendado que una validación de picos sea seguida por la validación del promedio móvil o validación en un solo punto antes de una validación del campo completo. Los métodos los cuales substituyen vectores deben ser aplicados al final y solo bajo ciertas condiciones.

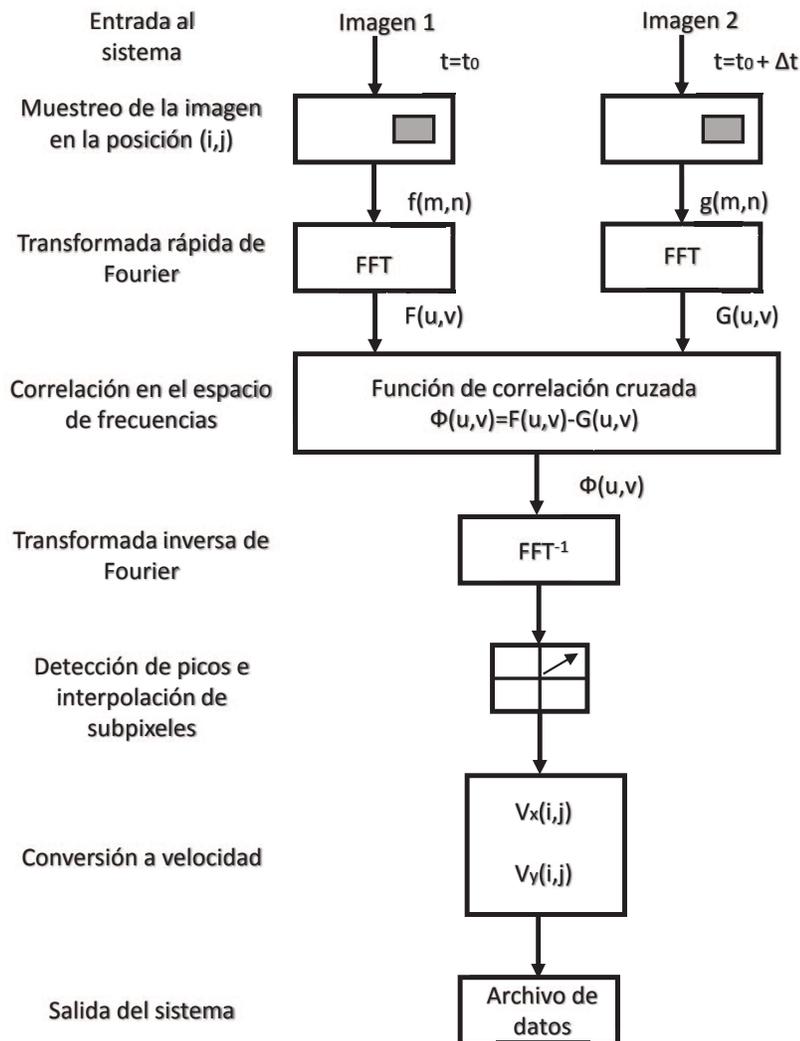


Figura 3.4: Método de correlación cruzada para el procesamiento de imágenes de PIV^[1].

Capítulo 4

Descripción experimental

El desgasificado del aluminio líquido mediante la técnica de rotor-inyector representa el paso en donde el hidrógeno atómico disuelto en el aluminio líquido es retirado del baño. Se utilizó un modelo físico de forma que simule el proceso de desgasificado de aluminio líquido con rotor-inyector, el modelo original corresponde a un reactor industrial tipo batch utilizado por la compañía Cooper Cruse Hinds como se muestra en Figura 4.1a, el modelo físico consiste de un cilindro de acrílico transparente de escala 1:1, para evitar la distorsión óptica el modelo físico fue insertado en un cubo de acrílico transparente. En la Figura 4.1b se muestra una fotografía, las dimensiones del modelo físico se muestran en el Cuadro 4.1.

Para la determinación experimental de los perfiles de velocidad se utilizó un equipo velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) de la compañía Dantec Dynamics[©], el cual está formado por un láser de 527 nm de longitud de onda, dos cámaras Phantom de alta velocidad, un trípode para controlar el movimiento de la(s) cámara(s) y un equipo de cómputo para la adquisición y

| | Cilindro de acrílico | Chaqueta de acrílico |
|--------------|----------------------|----------------------|
| Diámetro [m] | 0.52 | – |
| Altura [m] | 0.64 | 0.64 |
| Ancho [m] | – | 0.64 |

Cuadro 4.1: Dimensiones del modelo físico.



(a)



(b)

Figura 4.1: a) Reactor industrial utilizado para la desgasificación de aluminio líquido. b) Modelo de acrílico utilizado^[12].

procesamiento de imágenes obtenidas por la cámara, el software utilizado fue el DynamicsStudio 4.0.37. El Cuadro 4.2 muestra las características del sistema PIV. En la Figura 4.2 se muestran los componentes principales del equipo PIV.

En la parte experimental se determinó la hidrodinámica de tres rotores fabricados en Nylamid, los cuales fueron denominados como Rotor estándar, muescado y novel, los dos primeros rotores son de uso industrial utilizados por la compañía FOSECOTM, finalmente el rotor llamado novel, es un diseño propuesto como parte de este trabajo. En la Figura 4.4 se muestran las fotografías de los rotores, el diámetro de cada uno de estos es el mismo y es $d=17$ cm. Para la determinación de la hidrodinámica provocada por los diferentes rotores se realizaron pruebas con y sin inyección de gas para diferentes flujos; como se ha demostrado por Hernández-Hernández (2015)^[20,21], la inyección mediante la flecha y velocidades altas de rotación proporcionan el mejor mezclado dentro de la olla. De esta manera se establecieron los experimentos mostrados en el Cuadro 4.3.

| Cantidad | Descripción | Modelo |
|----------|--|---------------------------|
| 1 | Cabeza Láser Nd:YLF Class 4 | LDY302 PIV (Litron Laser) |
| 1 | Traverse | 2344119311V02 |
| 1 | Workstation Dell Precision | T7600 |
| 1 | Software Dantec Dynamics | v4.00 |
| 2 | Cámaras Speed Sense Phantom | M3205 12-28 VDC |
| 1 | Bomba de enfriamiento | LDY302 PIV |
| 1 | Filtro para cámara de $\lambda=527$ nm | 9080S0851 |

Cuadro 4.2: Descripción del equipo para la realización de la técnica de PIV.

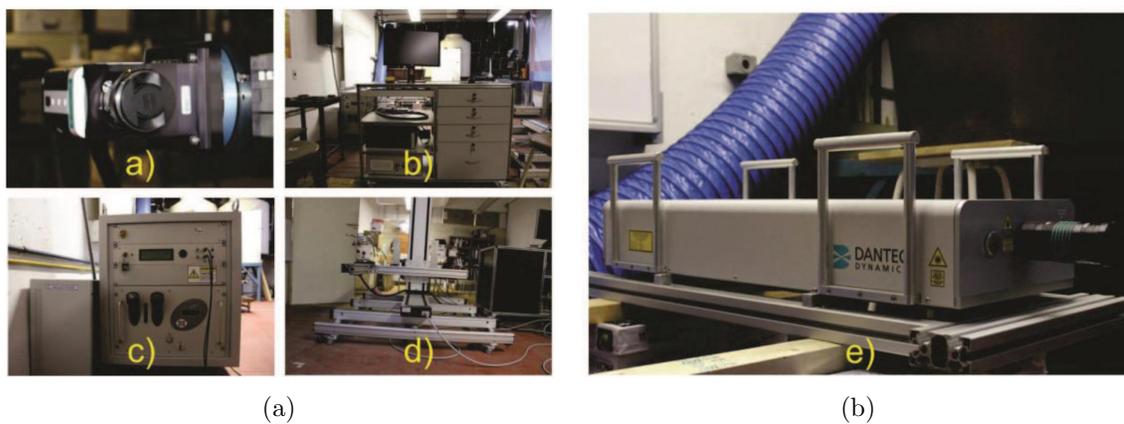


Figura 4.2: Componentes principales del sistema PIV: a) cámara de alta velocidad; b) estación de trabajo; c) bomba de enfriamiento; d) sistema traverse; e) láser.

| Rotor | Velocidad de rotación [rpm] | Flujo de gas [LPM] |
|--------------|-----------------------------|--------------------|
| Estándar | 600 | 0 |
| | | 10 |
| | | 40 |
| Muescado | 600 | 0 |
| | | 10 |
| | | 40 |
| Nuevo diseño | 600 | 0 |
| | | 10 |
| | | 40 |

Cuadro 4.3: Condiciones experimentales utilizadas para la evaluación de los rotores.

4.1. Métodos y materiales

En la literatura se han identificado los factores más importantes que influyen en el proceso de desgasificación, algunos de estos parámetros son la velocidad de rotación del impulsor, las características geométricas de los rotores, y la tasa de inyección de flujo de gas. El desarrollo de este trabajo se realizó en dos partes principales: la primera corresponde a la obtención de los campos de velocidad de manera experimental mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), y la segunda parte del trabajo incluye el análisis de las curvas de la cinética de desgasificado en el modelo de agua.

4.1.1. Modelo físico

En este trabajo, la configuración experimental consiste en un modelo físico que simula el proceso de desgasificado de aluminio líquido por medio del método de rotor-inyector. Para modelar el proceso de desgasificación se utilizó un tanque de acrílico, el cual se llenó de agua y se encuentra a una escala 1:1, con respecto a una olla de aluminio industrial. Con el fin de mantener las características del flujo real del proceso de desgasificación, el modelo físico y los impulsores conservan los principios

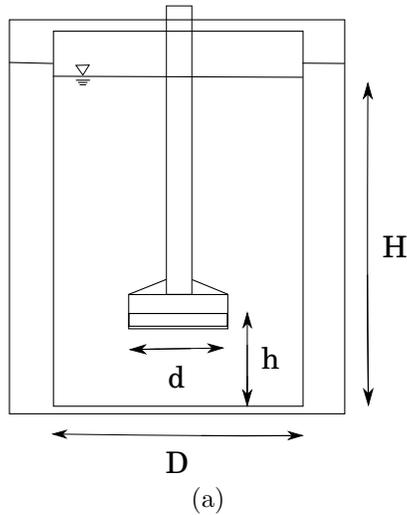


Figura 4.3: Configuración experimental empleada en la experimentación: a) Dimensiones del arreglo; b) imagen del arreglo.

de similitud geométrica e hidrodinámica. El tanque es un cilindro de acrílico con fondo plano, con un diámetro de $D=50$ cm, la altura del líquido (H), es igual al diámetro del tanque. El contenedor se colocó dentro de una caja de acrílico con el fin de igualar los índices de refracción y evitar la distorsión óptica debido a la curvatura del tanque. Tanto el tanque cilíndrico como el contenedor cuadrado fueron llenados con agua. En este estudio fueron analizados tres arreglos de rotores-inyectores, cuyos diámetro fueron de 17 cm, lo cual establece una relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque de $d/D=1/3$. En la Fig. 4.3a), d es el diámetro del rotor, D es el diámetro del tanque, h es la distancia desde la parte inferior del tanque hacia la parte baja del rotor y H es la altura del líquido. La Figura 4.3b) muestra la configuración experimental para los experimentos de visualización, que consiste en un tanque y el sistema de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).

Tanto la flecha como los tres rotores fueron construido en Nylamid; este material presenta una alta resistencia al desgaste y altas propiedades mecánicas. Estos rotores han sido descritos detalladamente en investigaciones previas y se muestran en la Figura 4.4^[12,18,20–22,34,35]. En primer lugar describiremos un rotor conocido co-

mo estándar (Fig. 4.4 a), el cual es un diseño ampliamente utilizado, que consiste en un disco provisto con boquillas laterales. La segunda geometría es un rotor el cual, en este trabajo llamaremos muescado, y es similar al descrito anteriormente, se encuentra equipado con boquillas y muescas (Fig. 4.4b). Como se ha mencionado anteriormente, estos dos rotores son diseños comerciales ampliamente utilizados en la industria. El último rotor analizado en este trabajo, es una nueva propuesta de rotor que se diseñó como parte del presente trabajo. La característica principal de este rotor es que la parte inferior presenta una geometría asimétrica con respecto a los diseños descritos anteriormente. El nuevo diseño es una modificación de un rotor no comercial, con el cual se realizaron pruebas a nivel laboratorio en el trabajo doctoral de Camacho-Martínez^[8, 9]. La principal diferencia en relación al trabajo de tesis antes mencionado, es el aumento en el número de aspas de cuatro a cinco y la modificación de su ángulo de ataque. En esta propuesta, el rotor se encuentra provisto de cinco aspas en un ángulo de 60° (Fig. 4.4h,i). Esto se planteó con el fin de aumentar el bombeo y generar el mezclado entre las diferentes capas de fluido, provocando de esta manera que el fluido que se encuentra en la parte baja del contenedor sea arrastrado desde el fondo del tanque hacia el impulsor y éste lo expulse hacia las paredes del tanque. Debemos recordar que al tratarse de un sistema bifásico y que al introducirse el gas por medio de la flecha del agitador, este gas se encontrará en contacto directamente con el fluido antes mencionado.

Para la determinación de la hidrodinámica generada por los diferentes rotores se realizaron pruebas con y sin inyección de gas para diferentes tasas de gas de purga; como se ha demostrado por Hernández-Hernández (2015)^[20], la inyección a través de la flecha y utilizando velocidades de rotación altas se logra generar un mejor rendimiento en ollas de refinación de aluminio. El régimen de flujo se determina mediante el número de Reynolds que, como se describió antes en un sistema agitado, se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho N d^2}{\mu} \quad (4.1)$$

donde μ y ρ son la viscosidad y la densidad del fluido de trabajo, respectivamente, N es la velocidad de rotación del impulsor y D es el diámetro del impulsor. En este estudio, el número de Reynolds es 193,000 para todos los rotores. La velocidad de

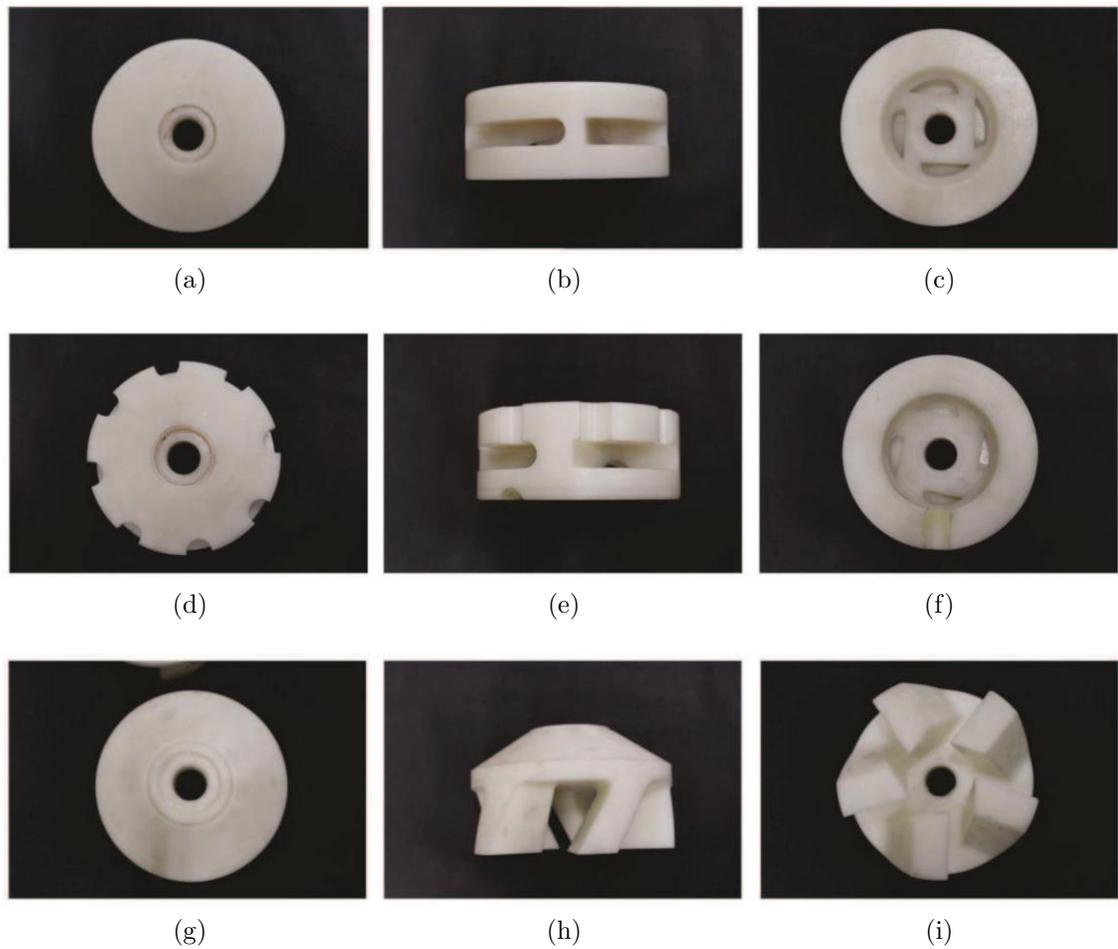


Figura 4.4: Fotografías de los tres rotores utilizados en este trabajo. La primera columna muestra la vista superior, segunda columna, vista lateral, tercera columna, vista inferior. La primera y segunda fila corresponden a los rotores comerciales, fila 1, rotor estándar, fila 2, rotor muescado. La fila 3 corresponde al nuevo de diseño de rotor propuesto en este trabajo.

rotación experimental se fijó en 600 rpm. La velocidad de agitación fue controlada manualmente y fue medida al principio y al final de cada medición por medio de un tacómetro digital (DT- 1238L, Lutron).

En cuanto a los experimentos de flujo de dos fases, se usa aire como la fase gaseosa y se introdujo en el tanque a través del eje del rotor, que se considera el método de inyección de gas convencional ampliamente utilizado en la industria. Se utilizaron dos tasas de inyección de gas las cuales fueron fijadas a 10 y 40 LPM, y fue controlada cuidadosamente por medio de un flujómetro; es importante mencionar que estos flujos son condiciones de operación industriales. De esta manera se establecieron los experimentos mostrados en el cuadro 4.3.

4.1.2. Velocimetría por imágenes de partículas

La importancia de la determinación de los parámetros de funcionamiento adecuados en sistemas de desgasificado, se basa en el conocimiento del comportamiento hidrodinámico del fluido. De esta manera, es necesario analizar la modificación de la hidrodinámica debido a la presencia de gas. La determinación experimental de las características hidrodinámicas del sistema se llevó a cabo por medio de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Este sistema está integrado por un láser con una longitud de onda de 527 nm, una cámara Phantom de alta velocidad, un sistema de sincronización y un equipo de cómputo para la adquisición y procesamiento de imágenes obtenidas por la cámara. En el presente estudio, el sistema fue sembrado con partículas trazadoras de poliamida de 20 μm de diámetro, recubiertas de rodamina B (Dantec Dynamics). La cámara fue equipada con un filtro óptico de 550 nm, con el objetivo de diferenciar entre la luz de las partículas trazadoras de la luz reflejada por las burbujas dentro del flujo. La adquisición y el procesamiento de las imágenes se llevó a cabo con el software DynamicStudio (Dantec Dynamics). Las mediciones se realizaron en un plano axial en el centro del recipiente, paralelo al impulsor en el plano formado por el eje horizontal y vertical. Debido a la presencia del eje y a la sombra generada por éste, las mediciones se realizaron considerando una sola mitad del contenedor para describir completamente la hidrodinámica de la olla. Esta aproximación está bien justificada debido al eje de simetría de los impulsores investigados. Un dispositivo óptico se ensambla al láser para generar una hoja

de luz delgada (~ 1 mm). La hoja de láser es particularmente útil para orientar la cámara que debe enfocar perpendicularmente hacia la hoja de láser. En cuanto a los campos de velocidad, estos fueron determinados por medio de la adquisición de una serie de pares de imágenes, donde el tiempo entre cada par de imágenes para nuestras mediciones fue de $1,000 \mu\text{s}$. Los campos de velocidad se calculan utilizando el método de correlación cruzada. Para la utilización de este método, cada imagen se dividió en zonas de interrogación de 32×32 píxeles con un traslape de $50 \times 50\%$, de esta manera, se generaron 8806 vectores de velocidad para cada imagen. En cada campaña experimental, 1500 pares de imágenes fueron adquiridas con el fin de obtener un promedio robusto. La Figura 4.5, muestra el arreglo experimental, el cual consiste en un tanque, un rotor-inyector, el sistema de velocimetría y un medidor de oxígeno.

4.1.3. Cinética de desgasificado

En el mismo modelo físico de agua se estudió la cinética de desgasificado de aluminio. El comportamiento del gas en el aluminio fundido fue modelado utilizando oxígeno para saturar agua, se inyectó aire dentro del contenedor hasta alcanzar un estado saturado (6 ppm de O_2). La desgasificación fue llevada a cabo inyectando nitrógeno de alta pureza (99.9%), a la misma tasa de inyección de gas utilizada en los experimentos de la caracterización hidrodinámica (10 y 40 LPM). Un medidor de flujo se utilizó para medir la cantidad de aire suministrado. La inyección de nitrógeno fue a través de la flecha del impulsor y la velocidades de agitación fue la misma para todos los casos (600 rpm), esto con el objetivo de observar la influencia de la tasa de inyección de gas sobre la cinética de desgasificado. Las mediciones de la concentración de oxígeno fueron tomadas cada 5 segundos, utilizando un medidor de oxígeno disuelto comercial (Hanna HI-9146), como se muestra en la Figura 4.5.

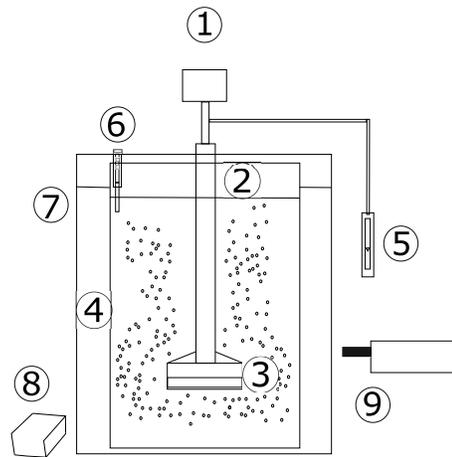


Figura 4.5: Esquema del montaje experimental: 1) motor; 2) flecha del impulsor; 3) rotor-inyector; 4) tanque; 5) flujómetro de gas; 6) medidor de oxígeno disuelto; 7) caja de visualización; 8) cámara de alta velocidad; 9) láser pulsado.

Capítulo 5

Resultados

El análisis del comportamiento de la hidrodinámica del sistema agitado es de suma importancia para evaluar la eficiencia del transporte de masa en las operaciones de desgasificado de aluminio. Esto es de particular interés en los sistemas de desgasificado en los cuales se emplean dispositivos de rotores-inyectores. Como en cualquier tanque de mezclado, en los sistemas de agitación gas-líquido, la forma del agitador determina el grado de interacción existente entre las corrientes de fluido generadas por la acción del impulsor y la cantidad de gas inyectado en el contenedor. Como se mencionó anteriormente, el análisis se realizó comparando el cambio en las propiedades hidrodinámicas de los campos de velocidad en una sola fase con respecto a dos caudales diferentes de inyección de gas. En la Figura 5.1, se muestran imágenes típicas de la dispersión de gas de los tres rotores a las mismas condiciones de operación. De manera general se observa un amplio rango de tamaños de burbujas. En todos los casos se nota una alta concentración de burbujas alrededor de los rotores, pero diferentes estados hidrodinámicos pueden notarse de los cuales se destaca una mejor dispersión de las burbujas en el nuevo diseño de rotor en donde se puede ver que las burbujas se encuentran en prácticamente todo el contenedor, esto para ambas condiciones de gas (10 y 40 LPM), sin embargo es en esta última en donde puede apreciarse la diferencia en el desempeño entre los tres rotores (Fig. 5.1c). Así también puede verse que es en este rotor en donde se forman burbujas de un diámetro menor en comparación a los rotores comerciales. En este capítulo, se presenta una descripción detallada de las características hidrodinámicas de tres

rotores-inyectores con diferentes geometrías, como se dijo anteriormente, dos de ellos son diseños comerciales y uno de ellos es un nuevo diseño propuesto en esta tesis. Se analizaron los patrones de velocidad, la distribución de la magnitud de velocidad, los perfiles de capacidad de bombeo y los patrones turbulentos.

5.1. Patrones de flujo

La Figura 5.2 muestra los patrones de flujo producidos por las diferentes geometrías de impulsores bajo las distintas condiciones de gaseado (una fase y dos condiciones de gaseado). Los experimentos se realizaron a 600 rpm, tanto para las condiciones de inyección de gas como en una sola fase. Las Figuras 5.2 (a, d, g) muestran los patrones de velocidad para el rotor estándar en la mitad del plano de medición. El patrón de flujo para el caso de una sola fase se muestra en la Figura 5.2 (a). Se muestra como una corriente de fluido es expulsada de manera radial del rotor hacia la pared del contenedor. Esto ya ha sido observado anteriormente por Gómez et al., 2013. Se puede notar la formación de dos recirculaciones de líquido debido al choque de la corriente en la pared lateral del tanque, la rotación de estos es en sentido inverso una con respecto a la otra (una en el sentido y a contra sentido de las manecillas del reloj). Estas recirculaciones se encuentran en la zona media del impulsor, una en la parte inferior y la otra se encuentra por encima de este. De manera general, se puede decir, que el fluido impulsado por la acción del rotor produce una fuerte circulación en la parte inferior del modelo físico; mientras que en la sección superior del contenedor se observan velocidades pequeñas y por lo tanto no se tiene una buena circulación. La modificación de la hidrodinámica debido al gas introducido para ambas tasas de inyección (10 y 40 LPM) para el rotor estándar se muestra en los campos de flujo de la Figura 5.2 (d, g), respectivamente. Primero analizaremos el cambio en el patrón de flujo a una tasa de inyección de gas baja (10 LPM), en donde se puede notar que la recirculación de líquido se modifica y se desplaza en dirección axial. Esto se debe principalmente al momento adicional inyectado al fluido debido a la entrada del gas a la altura del rotor, de esta manera el flujo en esta zona se dirige completamente en dirección radial. Esto es al parecer un efecto combinado del fluido desplazado por el rotor, el cual es intensificado por el

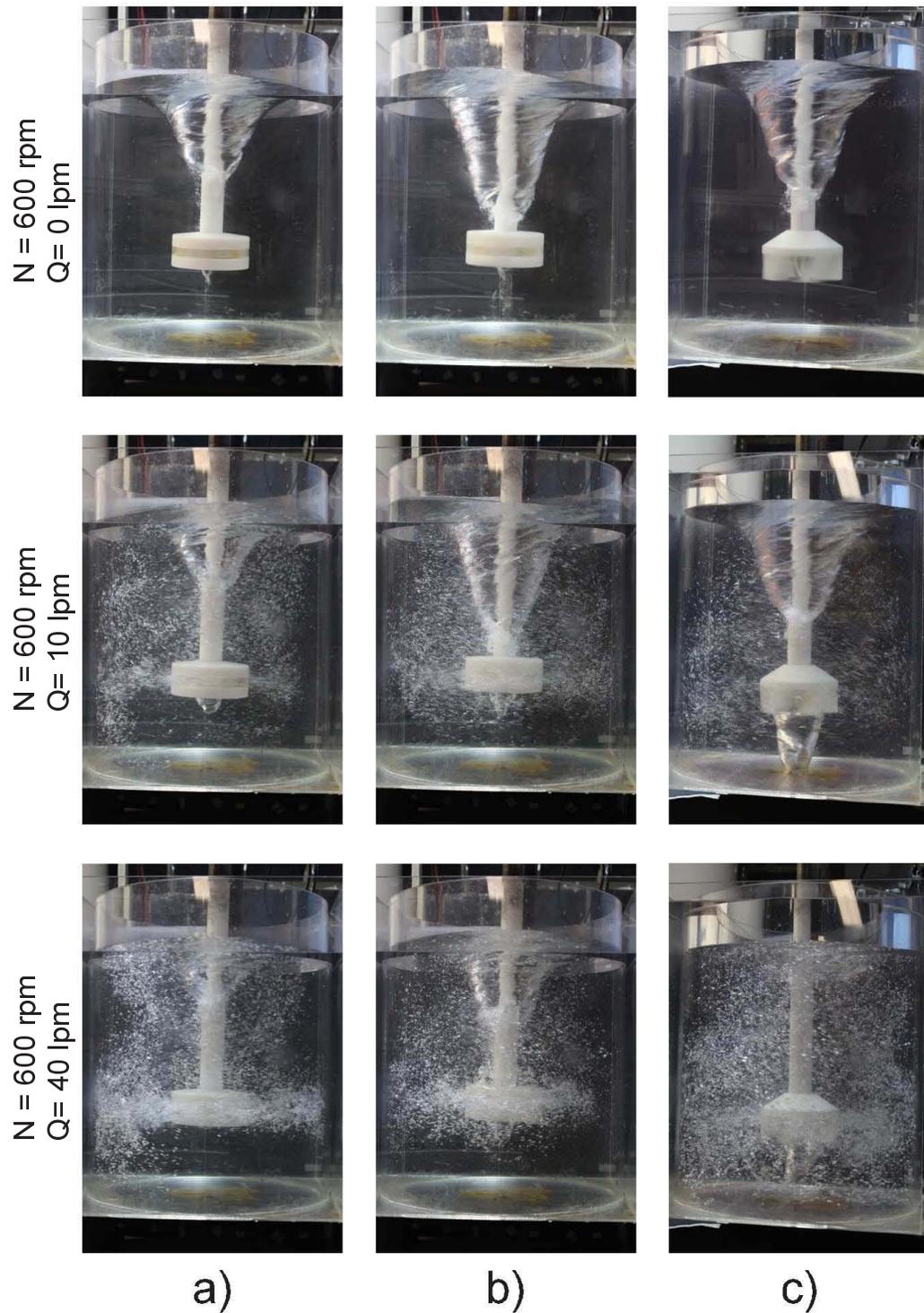


Figura 5.1: Fotografías de los tres rotores utilizados en este estudio a las tres diferentes condiciones de inyección de gas (0, 10 y 40 LPM). Se observan los diferentes estados hidrodinámicos en la olla, puede notarse la diferencia en la dispersión del gas y la formación de diferentes tamaños de burbujas. a) rotor estándar; b) rotor muescado y c) nueva propuesta de rotor.

paso de las burbujas, en un inicio en dirección radial, seguido por un flujo con mayor energía hacia la parte superior del contenedor. En términos generales, el mecanismo de formación del vórtice de fluido es la misma que para el caso de una sola fase, en donde este es generado debido al choque del fluido con las paredes del contenedor. Además de lo anterior, también puede observarse que, en la región superior de la olla, el fluido se mueve hacia la superficie del tanque. Debido a los resultados presentados aquí, puede decirse que el rotor estándar es incapaz de dispersar completamente el gas en todo el dominio de flujo. Además, se puede notar que, en la región superior del tanque en la zona cercana al vórtice de gas, se genera un flujo radial, el cual se genera debido a las fuerzas centrífugas producidas por este. Puede verse al observar el vórtice de gas para el caso de una sola fase con respecto a los casos gaseados, que al momento de que las burbujas ascienden por el contenedor, estas empujan el vórtice, modificando su forma y tamaño. Este efecto no está presente para los otros rotores en estudio, lo que sugiere que, para el diseño de rotor estándar, una buena cantidad de burbujas ascienden cerca del eje de simetría de la olla. Para el caso cuando se tiene una inyección de gas alta (40 LPM), los patrones de flujo presentan un comportamiento similar al caso de una baja tasa de inyección de gas, pero algunas diferencias importantes pueden notarse. En este caso puede verse un incremento en el flujo radial y un notorio aumento en la cantidad de líquido desplazado por el impulsor hacia la pared del contenedor. Al observar la sección superior del recipiente puede verse como el tamaño del vórtice de gas se reduce y las corrientes radiales tienen una mayor evolución. De manera general, se observa una disminución en la capacidad del agitador de promover el movimiento del fluido ya que una buena parte del este es debido a la inercia producida por el vórtice de gas. Como resultado, una mayor cantidad de fluido es arrastrado hacia arriba por el paso de las burbujas, el flujo se divide y una parte va a hacia arriba mientras la otra es dirigida hacia las paredes del contenedor. Así también puede observarse que esta parte del flujo que se dirige hacia las paredes del tanque, alimenta la formación de la circulación con lo que se aumenta el tamaño de esta cerca de la pared, mientras que la pequeña recirculación que se formaba en la parte inferior del rotor se disipa completamente.

A continuación, en la Figuras 5.2 (b, e, h) se muestran los resultados correspondientes al rotor-inyector muescado, tanto para las condiciones en una sola fase como

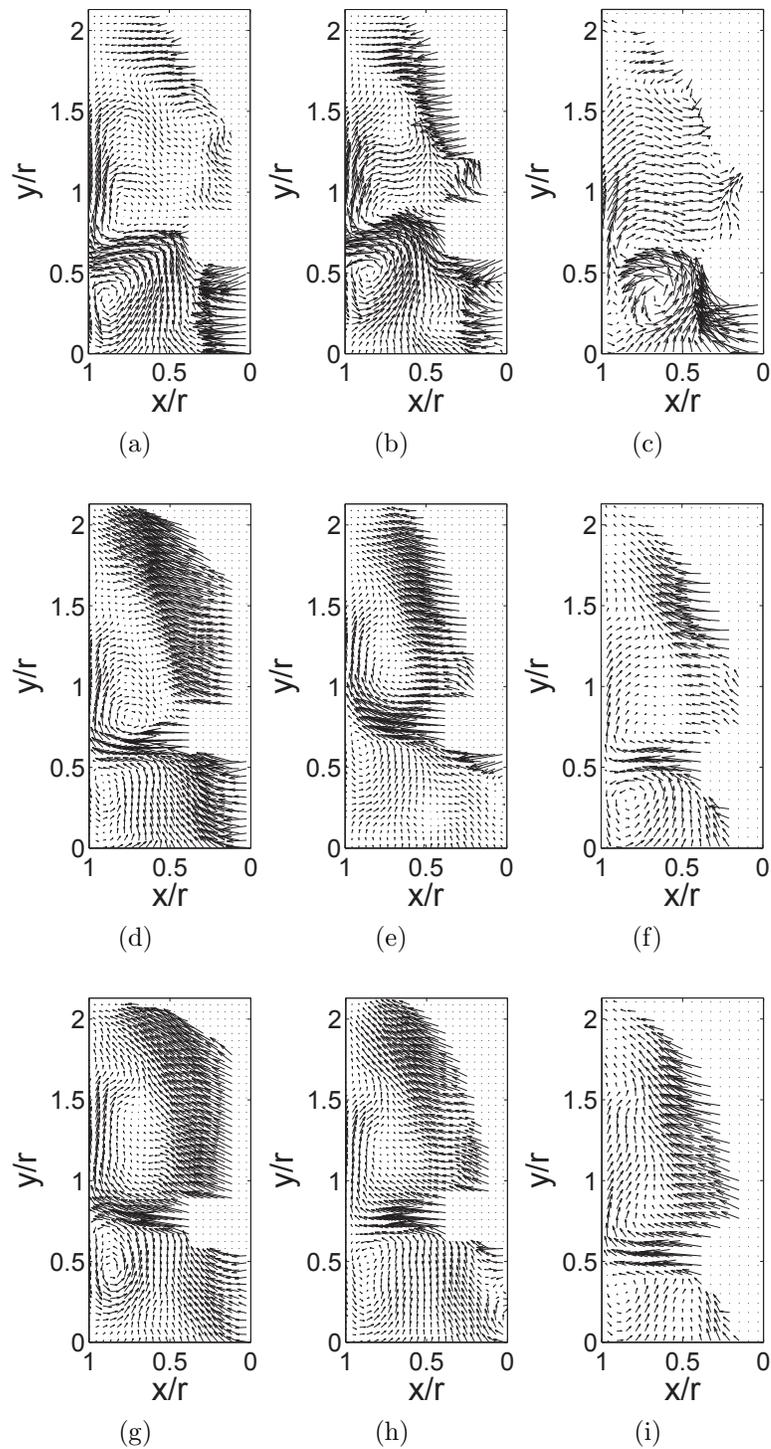


Figura 5.2: Patrones de flujo. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones no gaseadas; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor.

para las dos tasas de inyección de gas utilizadas. Los patrones de flujo para el caso de no gaseado se muestran en la Figura 5.2(b). Al igual que en el caso del rotor estándar, el flujo es impulsado principalmente en la dirección radial en el área cercana al rotor. Es evidente que el fluido es impulsado por el rotor muescado hacia a las paredes laterales, favoreciendo el mezclado del fluido por medio de fuertes corrientes. Dichas corrientes crean una gran zona de recirculación, por debajo del nivel del rotor, cerca de la pared de la olla. Se puede observar que el tamaño del vórtice de gas es un poco más grande con respecto a la encontrada para el caso del rotor estándar en una sola fase. Se observa que la inercia generada por la presencia del remolino de aire, ayuda a desplazar el fluido y dirigirlo hacia las paredes laterales. Como consecuencia de esto, se genera un fuerte flujo radial en la región superior del recipiente. En la sección media del contenedor, se observa la interacción entre esta corriente y el fluido desplazado por el rotor. De manera interesante, el patrón de velocidades se ve afectado considerablemente por el flujo de gas inyectado dentro del contenedor. En las Figuras 5.2 (e, h) se muestran en los patrones de flujo para ambas condiciones de gaseados. El patrón de flujo obtenido para las condiciones de inyección de gas (10 y 40 LPM) para el rotor muescado presenta características similares que, para el caso de una sola fase, aunque una ligera disminución en sus velocidades puede apreciarse. Esta disminución general en el tamaño de los vectores de velocidad es debida principalmente al arrastre de fluido producido por el movimiento de las burbujas. El *loop* de recirculación en el fondo de la olla es casi desvanecido; se aprecia que el líquido todavía es desplazado por el rotor-inyector. Una importante corriente es generada por la acción del impulsor en dirección radial, sin embargo, no es suficientemente fuerte para alcanzar la pared de la olla. El gas es expulsado por el rotor en forma de burbujas y el fluido es arrastrado por el paso de estas de tal manera que se mueven verticalmente hacia la superficie libre del contenedor. El vórtice de gas generado por la rotación del impulsor, no muestra evidencia de cambio en su tamaño debido a la entrada de gas, a diferencia del caso del rotor estándar. A partir de los resultados demostrados en estos mapas, es posible afirmar que la inyección de burbujas no tiene una influencia notable sobre la generación del vórtice de gas. Además, como ya se mencionó anteriormente, en la sección superior de la olla, el vórtice de aire ayuda a desplazar el líquido en la dirección radial, a medida que las burbujas se acercan

más a la influencia del vórtice de gas, la circulación de las burbujas en la dirección tangencial es mayor. El patrón de flujo encontrado para el caso del nuevo diseño de rotor-inyector se muestra en la Figura 5.2 (c, f, i) tanto para condiciones en una sola fase, así como para bajas y altas condiciones de gaseado. En la Figura 5.2(c) se muestra el campo de velocidades en el plano central para el caso de una sola fase. En este nuevo rotor se observó que, debido a su geometría compleja y su asimetría en la parte inferior, el vórtice de gas se hace más pequeño que para los casos del rotor estándar y con muescas bajo estas mismas condiciones. Esto es una indicación de que la mayor parte del fluido es impulsado por la sección inferior del nuevo dispositivo de rotor-inyector y en una menor proporción debido al vórtice de gas. Claramente se aprecia la forma en la que el líquido es succionado por la parte inferior del impulsor, creando una fuerte corriente dirigida en dirección axial. En este diseño experimental se forma un *loop* de fluido en la zona baja del contenedor. Esta recirculación de fluido presenta un mayor tamaño que para el caso de otros impulsores. Dicha recirculación se genera por el fluido succionado por la base irregular del rotor, que es un mecanismo diferente al encontrado en los rotores estándar y con muescas, en donde este se genera debido a que el fluido es empujado hacia las paredes laterales del recipiente. Dicho mecanismo produce una recirculación considerable, además de un mayor nivel de agitación del fluido la cual ocupa regiones más grandes en el recipiente. Los patrones de velocidad en condiciones gaseadas para la geometría de rotor propuesta se muestran en la Figura 5.2 (f, i). Se puede observar que a medida que el gas se dispersa en el contenedor a través de las irregularidades en la parte baja del rotor, la intensidad de circulación de fluido disminuye, además, de que los loops de recirculación cambian su forma y disminuyen su tamaño. Este cambio en el comportamiento del patrón de flujo se debe a una mayor velocidad de desplazamiento del flujo de gas inyectado, la cual modifica la cantidad de líquido succionado por el rotor. Al igual que en los otros casos las burbujas arrastran fluido desde el fondo del contenedor hacia arriba, mientras que el rotor-inyector empuja el líquido hacia la pared lateral. Este mecanismo es diferente que para el caso sin inyección de gas, sin embargo, es similar al que se encuentra en los patrones de flujo de una sola fase para los rotores estándar y muescado, en el que el patrón general de velocidad tiene tanto componentes radiales como axiales. Sin embargo, este agitador todavía

es capaz de generar una recirculación de flujo significativa, con un par de pequeños vórtices de fluido que contribuyen a la circulación en todo el recipiente. Como en todos los resultados experimentales mostrados anteriormente, en la sección superior del recipiente el vórtice de gas produce un fuerte flujo radial, el cual empuja el fluido hacia las paredes laterales. Al comparar el desempeño de las diferentes geometrías de rotores, se puede decir que el nuevo diseño de rotor-inyector parece exhibir un mejor rendimiento para mezclar el líquido y el gas a altas tasas de inyección. Al analizar todos los patrones de flujo de los diferentes rotores es posible observar las diversas modificaciones del flujo, esto es útil en la identificación de la posición de las corrientes más importantes las cuales son capaces de manejar la cantidad de gas inyectado.

5.2. Magnitud de la velocidad

El análisis de las corrientes de fluido generadas por los distintos rotores nos permite observar la modificación de los patrones de flujo. Como se mencionó en la sección anterior, esto nos permite identificar el comportamiento del flujo y localizar la ubicación de las corrientes de fluido más relevantes dentro del contenedor. Sin embargo, dicha descripción no nos proporciona una caracterización cuantitativa de la modificación del flujo. Debido a esto, es necesario realizar una comparación en términos de las magnitudes de velocidad, en esta sección se presenta un estudio comparativo de este parámetro. La magnitud de la velocidad se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{V} = \sqrt{v_r^2 + v_z^2} \quad (5.1)$$

que en forma adimensional se representa:

$$V^* = \frac{\bar{V}}{Nd} \quad (5.2)$$

en donde N es la velocidad de rotación del impulsor, d es el diámetro del rotor, v_r y v_z son las componentes de la velocidad en las direcciones radial y axial, respectivamente. Los contornos de magnitud de velocidad se presentan en la Figura

5.3, tanto para las condiciones de inyección de gas, como para una sola fase, esto para las diferentes configuraciones de rotor-inyector. Nuevamente, las dimensiones vertical y horizontal se encuentran normalizadas con el radio de la olla. La magnitud de velocidad se presenta de manera adimensional por medio del uso de la velocidad de rotación del impulsor ($V_{rot} = Nd$), la escala de color representa la magnitud de velocidad adimensional. Para efectos comparativos, se utilizó la misma escala de color para todos los casos. Las Figuras 5.3 (a, b, c) muestran los mapas de contorno de la magnitud de velocidad para los rotores estándar, muescado y el nuevo diseño de rotor para condición de no gaseado, respectivamente. Al realizar el análisis de los mapas en una sola fase se muestra que los campos de flujo son similares para todos los rotores examinados, en ellos se muestran velocidades equivalentes. Además de esto, también puede notarse una región con altas magnitudes de velocidad del fluido cercana a la zona de dominio de los impulsores. A pesar de dichas similitudes, para el caso del rotor muescado, se observa un ligero incremento en la velocidad del líquido. El aumento en la velocidad del líquido en la zona media del contenedor es debido a las fuertes corrientes radiales generadas por el flujo desplazado por los rotores, lo cual ya se había observado anteriormente en el análisis de los patrones de flujo. En todos los casos se observan magnitudes de velocidad bajas en la mayor parte del contenedor, las velocidades más bajas se encuentran en las zonas alejadas de la posición de los rotores. En las Figuras 5.3 (d, e, f) se observa la respuesta de la magnitud de velocidad del fluido, debido a una baja tasa de inyección de gas. En general, el arrastre debido al movimiento de las burbujas produce un incremento en la magnitud de la velocidad en todos los casos. Puede notarse el movimiento hacia la parte superior del contenedor de una gran cantidad de líquido debido a la presencia del gas. Como consecuencia del flujo de gas introducido en el contenedor, el movimiento del fluido se vuelve principalmente radial. Las Figuras 5.3 (g, h, i) muestran la magnitud de velocidad del líquido para el rotor estándar, muescado y el nuevo diseño de rotor para el caso en los cuales se introduce una gran cantidad de gas dentro del contenedor (40 LPM). Se puede observar una importante tendencia decreciente en las magnitudes de velocidad tanto para el rotor estándar, así como para el rotor con muescas. En contraste, el comportamiento del nuevo diseño de rotor exhibe un incremento en la velocidad en la parte superior del recipiente (Figura 5.3 (i)). Además de esto, pue-

de verse que la intensidad de las magnitudes de velocidad es constante en la zona cercana al impulsor. En general, a medida que el gas se introduce a lo largo del eje del agitador, puede observarse un incremento en las magnitudes de velocidad del líquido. Es de notarse que bajo circunstancias en las que se tiene una alta tasa de inyección de gas, los rotores comerciales presentan una respuesta similar. Para ambas geometrías se encontró una disminución en la magnitud de velocidad del líquido. Por otra parte, el nuevo diseño de rotor presenta un incremento notable en la velocidad, a estas mismas condiciones de gaseado (40 LPM).

5.3. Campos de intensidad de turbulencia

En esta sección, se presenta el análisis de la influencia de la geometría del impulsor en la eficiencia de mezclado mediante el estudio y observación de las características turbulentas del flujo. Es posible calcular la intensidad de turbulencia (TI) como una función de los campos de velocidad a través de la siguiente ecuación:

$$TI = \frac{\sqrt{\overline{v_r'^2} + \overline{v_z'^2}}}{Nd} \quad (5.3)$$

En esta ecuación v_z' y v_r' son las fluctuaciones de velocidad en las direcciones axial y radial, respectivamente. La intensidad de la turbulencia, (TI), puede ser interpretada como el grado de agitación en el contenedor generada debido a la acción de los rotores. Para efectos comparativos, al igual que para la magnitud de velocidad, se utilizó la misma escala de color en todos los mapas. Además, se seleccionó un rango en la escala de color adecuado para poder observar claramente el efecto de la tasa de inyección de gas sobre el desempeño de las diferentes geometrías de rotores utilizados. En esta sección, pondremos especial atención en los mapas de intensidad de turbulencia tanto para las configuraciones gaseadas, como no gaseadas para los distintos impulsores, los cuales se muestran en la Figura 5.4. El análisis de los campos de turbulencia en el caso de una sola fase se presenta en las Figuras 5.4 (a, b, c), para el rotor estándar, el rotor muescado y el nuevo diseño de rotor, respectivamente. Como era de esperarse, en estos mapas se puede notar, que los mayores niveles de intensidad de turbulencia se encuentran ubicados en la zona cercana al rotor, en donde se muestra que los valores máximos se encuentran en la parte baja del rotor.

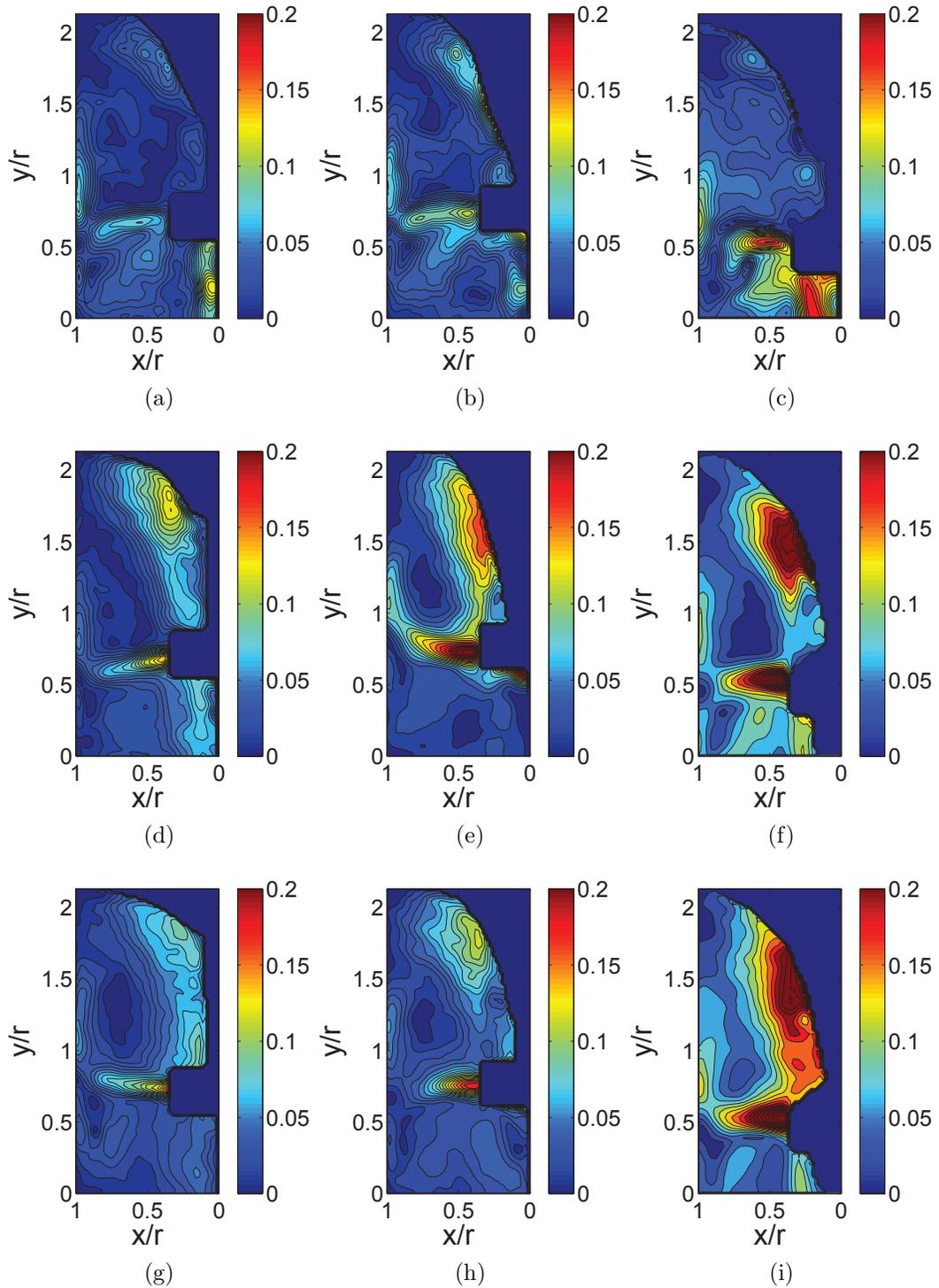


Figura 5.3: Magnitudes de velocidad. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones de no gaseado; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor.

Las zonas de alta intensidad de turbulencia que se encuentran alrededor del rotor corresponden a la región bajo la influencia de la zona de baja presión creada debajo de los rotores, la cual es generada debido a la succión del fluido, esto produce un flujo turbulento debido a los altos gradientes de velocidad en esta sección. Además, un hecho interesante es que para todos los rotores analizados las magnitudes de las fluctuaciones de velocidad son del mismo orden, aunque en el caso del rotor muescado se observa un pequeño aumento del área de altas intensidades de turbulencia (Figura 5.4(b)). La respuesta de las intensidades de turbulencia para todos los tres rotores analizados cuando se tiene una baja tasa de inyección de gas, se muestran en las Figuras 5.4(d, e, f). Se puede ver que los contornos turbulentos fueron modificados, sin embargo, existen características similares en todos ellos, en comparación con los mostrados para los casos de una sola fase. De esta manera, al observar los valores máximos de intensidad de turbulencia se aprecia que estos se encuentran en las regiones laterales y al fondo del contenedor, en la zona cercana a la parte inferior de los rotores. Se puede notar una disminución importante en la cantidad de turbulencia, en particular para el rotor estándar (Figura 5.4(d)). Por otra parte, el rotor muescado y el nuevo diseño de impulsor, también muestran una disminución, pero en menor grado (Figura 5.4(e, f)). Para el caso en el cual se tiene una alta tasa de inyección de gas de 40 LPM, se observa que los mapas de intensidad de turbulencia se modifican drásticamente y se presenta una importante disminución de la intensidad de turbulencia, como se muestra en las Figuras 5.4(g, h, i). Para el rotor estándar, se puede observar que los altos gradientes de velocidad que se desarrollaban en la zona por debajo del rotor se disipan completamente (Figura 5.4 (g)), esto se debe a la presencia de las burbujas, ya que estas absorben la energía cinética turbulenta en su superficie. Se encontró que, en el caso de rotor con muescas, la alta inyección de gas, también provoca un cambio en la naturaleza turbulenta del flujo (Figura 5.4(h)). Además de esto, también puede notarse una reducción en el tamaño de la zona turbulenta, en la que su intensidad disminuye hasta en un 50 %. Por otro lado, para cuando se tiene una elevada inyección de gas, el nuevo diseño de rotor exhibe un rango de intensidad de turbulencia del mismo orden que en las condiciones de gaseado anteriores (Figura 5.4i).

Al parecer en este caso, debido al impulso transferido al fluido por los bordes

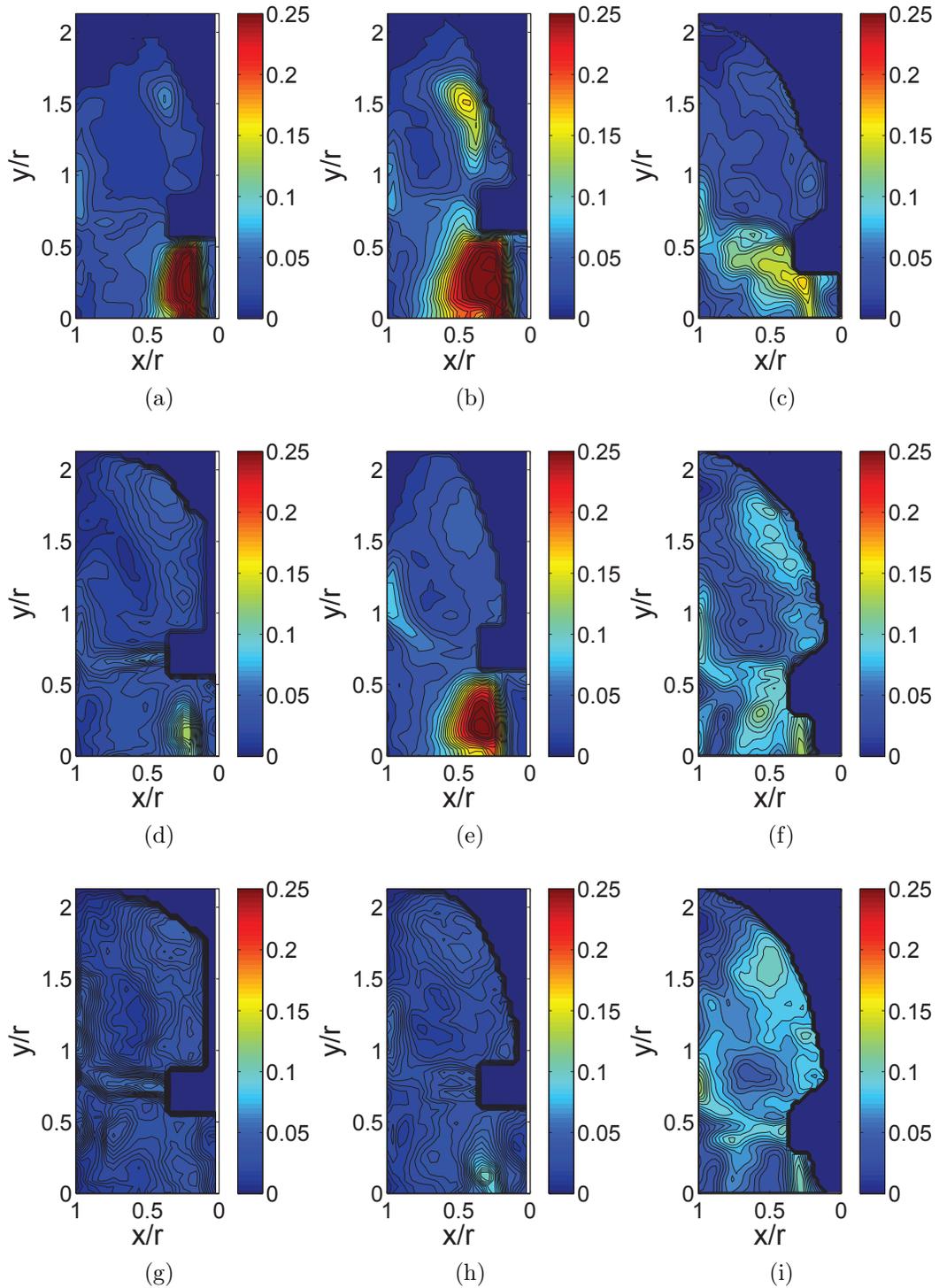


Figura 5.4: Intensidad de turbulencia. La primera columna muestra los mapas vectoriales en condiciones no gaseadas; la segunda columna muestra los patrones de flujo modificados bajo condiciones de gaseado a 10 LPM; la tercera columna muestra los patrones de velocidad bajo condiciones de gaseado a 40 LPM. a), d), g) Rotor estándar; b), e), h) Rotor muescado; c), f), i) Nuevo diseño de rotor.

dentados situados en la parte inferior del nuevo rotor y a la alta caída de presión generada por este diseño, el gas de entrada no es capaz de promover grandes cambios en el campo de flujo que sean suficientemente fuertes para amortiguar las fluctuaciones de velocidad en esta zona. Sin embargo, el aumento de la tasa de flujo de gas provoca una ligera reducción en la región de alta turbulencia situado por debajo del nuevo rotor, esto como resultado de la presencia de las burbujas que contribuyen a amortiguar las fluctuaciones de velocidad. Para los tres rotores, en la parte superior de la olla se observa que la influencia del rotor es imperceptible, dicha zona está dominada por el flujo en la dirección azimutal. Para el nuevo diseño de rotor, las mayores intensidades de turbulencia se observan a la máxima tasa de inyección de gas como se presenta en la Figura 5.4(i). Se puede decir que, aunque no es la configuración en la que se presentan las velocidades más altas, este rotor es capaz de generar fuertes fluctuaciones de turbulencia, las cuales interactúan con el gas inyectado. Para este rotor, el gas es atrapado debajo de él; debido a este confinamiento del gas y a que esta es la ubicación de las más altas intensidades de turbulencia, las burbujas interactúan con el líquido durante una mayor cantidad de tiempo.

5.4. Capacidad de bombeo

Por último, para complementar el análisis hidrodinámico, es importante cuantificar la cantidad de fluido desplazado por cada uno de los dispositivos de rotor-inyector. El mezclado es promovido por estas corrientes, las cuales generan las recirculaciones. Un parámetro importante para caracterizar estas corrientes es la capacidad de bombeo. Este parámetro puede ser inferido de los campos de velocidad y se define de la siguiente manera (Hidalgo-Millán et al, 2012):

$$Q_r = \int_0^z \bar{V}_r(z) dr dy \quad (5.4)$$

$$Q_z = \int_0^R \bar{V}_z(r) dz dy \quad (5.5)$$

La cantidad total de fluido bombeado por los rotores se cuantifica como:

$$Q_T = Q_r + Q_z \quad (5.6)$$

y en forma adimensional:

$$N_{Q_T} = \frac{Q_T}{Nd^3} \quad (5.7)$$

donde Q_r y Q_z son el caudal volumétrico en las direcciones radial y azimutal, respectivamente, R es el radio del contenedor, d el diámetro del rotor y N es la velocidad de rotación del impulsor. La Figura 5.5 muestra la sección transversal en la que se determinó el número de bombeo. Los perfiles de capacidad de bombeo se calcularon a una distancia de un radio del rotor a lo largo de la altura del contenedor. La elección de esta zona para realizar el cálculo, fue con el objetivo de obtener una sección del flujo de transporte de masa que fuera representativa de todo el dominio de flujo. La capacidad de bombeo absoluta inducida por los rotores se muestra en la Figura 5.6. Los perfiles axiales de bombeo radial (Q_r) para todos los impulsores muestran un comportamiento similar, pero también presentan notables diferencias en magnitud. Los perfiles azimutales de bombeo (Q_z), no fueron calculados debido a que el flujo que se observa en los patrones de velocidad (sección 5.1) son principalmente radiales, por lo que son estas corrientes las que generan la mayor parte del movimiento del fluido. En la Figura 5.6, para las tres diferentes condiciones de inyección de gas se identifican dos zonas distintas de alto bombeo radial, estas zonas corresponden tanto a la posición del rotor, así como a la zona de influencia del vórtice de gas. Lo anterior se debe a la contribución del vórtice de gas para desplazar el fluido hacia las paredes del contenedor. El vórtice de aire genera altas fuerzas centrífugas que produce un fuerte flujo radial. Este comportamiento se observa tanto para condiciones de gaseado como no gaseado para todas las geometrías utilizadas en este estudio. Estas corrientes estimulan el movimiento de las burbujas en todo el contenedor en dirección azimutal, lo que aumenta la tasa de transferencia de masa, esto mejora la eficiencia del proceso de desgasificación. Las curvas de la Figura 5.6(a) muestra las capacidades de bombeo radial para el rotor estándar donde se observa claramente que los perfiles de bombeo más bajos se obtienen para la condición de una sola fase. Como se mencionó anteriormente, en estos perfiles se observa que, tanto a 10 LPM como a 40 LPM de inyección de gas, el bombeo aumenta en el área del rotor en

aproximadamente el doble de su capacidad, con respecto al caso de una sola fase. Además, es notable que en la sección superior del recipiente, como se describió anteriormente, el tamaño de vórtice de gas se reduce, lo que implica que la capacidad de bombeo se reduce en esta zona. En la Figura 5.6(b) se presentan las capacidades de bombeo para el rotor muescado en donde se puede observar que para este impulsor, las regiones en las cuales se presentan las altas razones de bombeo son similares a la del rotor estándar, aquí también, los valores más altos se encuentran en condiciones de gasificación. Los valores más altos se encuentran a una distancia de 0.5 radios del agitador, medidos desde la parte inferior del contenedor, lo cual coincide con la ubicación rotor. Cabe señalar que, cuando se incrementa la tasa de inyección de gas dentro del contenedor (40 LPM), se produce una ligera disminución en la capacidad de bombeo para el rotor muescado de alrededor del 10 %. Al analizar el comportamiento de la nueva propuesta de diseño de rotor, en la Figura 5.6(c) se observa la respuesta del perfil de capacidad de bombeo debido a la presencia de las dos diferentes inyección de gas (10 y 40 LPM). En este caso, nuevamente se identifican dos regiones con altas capacidades de bombeo, las cuales se encuentran situadas en dos diferentes alturas del recipiente. Tales alturas corresponden a la región del vórtice de gas y a la posición de la sección media del rotor. Es notorio que una mayor cantidad de líquido es empujado en dirección radial. Por otro lado, la capacidad de bombeo del nuevo rotor para una sola fase es la más baja en la misma dirección, en donde se obtiene un valor mínimo. Por otro lado, aquí mismo (Figura 5.6(c)), se observa claramente un incremento substancial de los perfiles de bombeo bajo condiciones de 10 LPM, en el cual el aumento es de hasta un 50 %, pero para cuando el flujo de gas se incrementa (40 LPM), se observa un incremento significativos en toda la curva, sobre todo en la zona del rotor en donde llega a ser hasta del doble de su valor con respecto a la condición de una sola fase. A diferencia de los impulsores estándar y muescado, el nuevo diseño del rotor no disminuye su capacidad de bombeo cuando se aumenta el suministro de gas. Esto se puede interpretar como que este diseño de rotor propuesto es capaz de manejar una gran cantidad de gas inyectado dentro del recipiente. En todos los casos anteriores, la principal región de bombeo de fluido se encuentra cerca de la zona del rotor. Además, para todos los rotores se aprecia un aumento notable en la capacidad de bombeo bajo ambas situaciones de gasificado.

| | Q_r [$\frac{m^3}{s}$] | Q_z [$\frac{m^3}{s}$] | $Q_T = \sum Q_i$ [$\frac{m^3}{s}$] | N_{Q_T} [-] $\times 10^3$ |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| Rotor Estándar | | | | |
| no gaseado | 1.32 | 0.98 | 2.30 | 70.28 |
| 10 LPM | 2.39 | 1.26 | 3.65 | 111.55 |
| 40 LPM | 1.96 | 1.57 | 3.53 | 107.64 |
| Rotor Muescado | | | | |
| no gaseado | 1.71 | 1.17 | 2.88 | 87.91 |
| 10 LPM | 3.05 | 1.52 | 4.56 | 139.25 |
| 40 LPM | 2.03 | 1.55 | 3.58 | 109.36 |
| Nuevo diseño de rotor | | | | |
| no gaseado | 1.32 | 1.03 | 2.35 | 71.33 |
| 10 LPM | 2.38 | 1.40 | 3.81 | 118.23 |
| 40 LPM | 2.86 | 1.67 | 4.23 | 142.60 |

Cuadro 5.1: Número de bombeo y capacidades de bombeo en las direcciones radial y axial para todos los rotores bajo condiciones de gaseado y no gaseado.

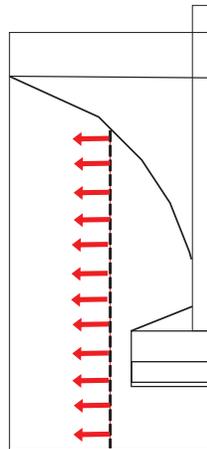
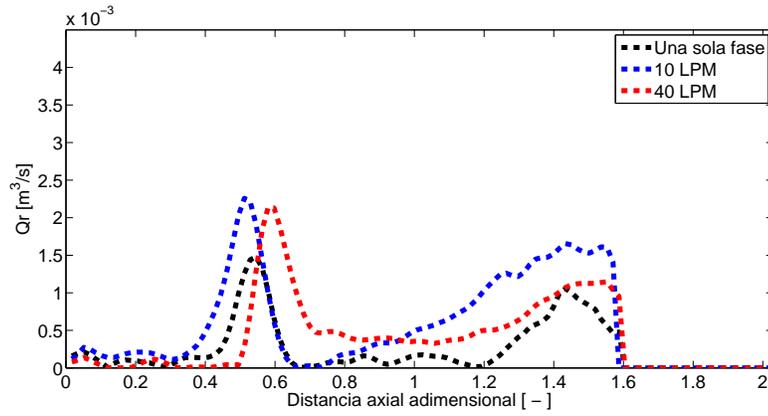
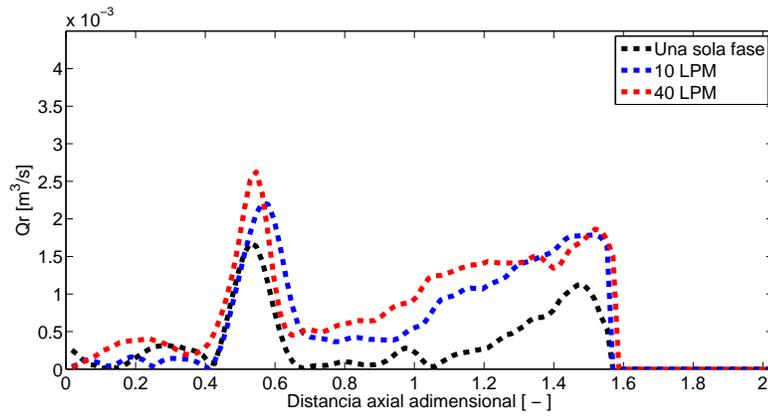


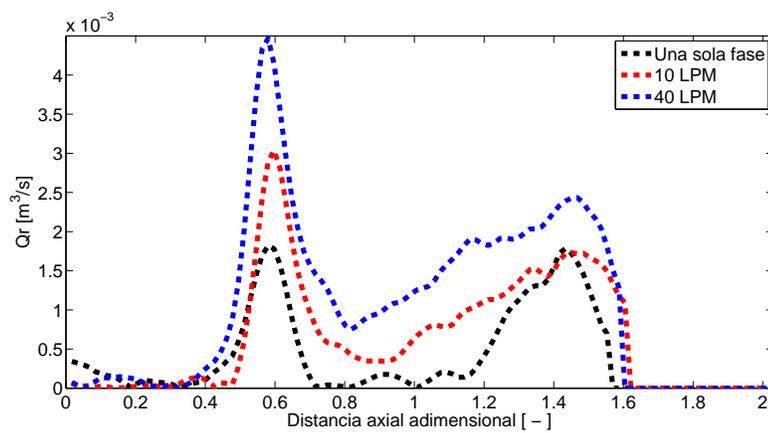
Figura 5.5: Sección transversal en la que se realizaron los cálculos del número de bombeo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6: Perfiles radiales de la capacidad de bombeo tanto para una sola fase, así como para las diferentes condiciones de gasificación (10 LPM y 40 LPM): a) rotor estándar; b) rotor muescado; c) nuevo diseño de rotor.

Aquí también, se calculó la cantidad media de fluido desplazado por los impulsores tanto en la dirección radial como en dirección axial. En el Cuadro 5.1 se encuentran resumidos los valores obtenidos para ambas capacidades de bombeo (radial y axial), así como también, el número total de bombeo para todas las condiciones de inyección de gas. Estos valores muestran la contribución del bombeo radial y axial en la capacidad total de bombeo. Para todos los rotores analizados en este trabajo, el bombeo radial aumenta debido a la presencia de burbujas. El análisis de la capacidad de bombeo total muestra claramente que la contribución más importante es debida al bombeo generado en la dirección radial. En la Figura 5.7, se muestra un comparativo del número de bombeo como una función de la tasa de inyección de gas para cada geometría de rotor. Es importante señalar que en la condición de una sola fase, los rotores estándar y el nuevo diseño presentan un comportamiento y una magnitud similar. Así también puede notarse que el rotor muescado exhibe un mayor número de bombeo que los otros dos diseños. El aumento de éste en relación a los otros rotores se encontró para ser alrededor del 25 %. Se encontró que a bajas condición de inyección de gas (10 LPM), el número de bombeo aumenta para los tres rotores. Para los casos del rotor estándar y el rotor muescado, se aprecian incrementos en este parámetro de alrededor del 58 %. Debemos mencionar, que se observa un incremento importante para el nuevo diseño de rotor el cual alcanza hasta un 66 %, la diferencia en el bombeo de número entre los impulsores sigue siendo aproximadamente del 25 %. Al enfocarnos en la situación de inyección en la cual se incrementa el flujo de gas (40 LPM), se puede notar que el rotor estándar prácticamente conserva la misma magnitud del número de bombeo con sólo una pequeña disminución de alrededor del 3.5 %. Por otra parte, al examinar el caso del rotor con muescas bajo una inyección de 40 LPM de gas, se puede notar una disminución importante de este valor de aproximadamente en un 22 %. Los rotores comerciales presentan valores cercanos bajo dicha condición de inyección de gas. Además, para el nuevo impulsor propuesto cuando se adiciona una gran cantidad de gas (40 LPM), en el sistema se observa un comportamiento distinto y el número de bombeo aumenta hasta en un 20 %. A partir de los resultados antes descritos, pueden observarse dos diferentes estados. En primer lugar, a baja condición de gaseado, el rotor muescado exhibe un rendimiento ligeramente mejor en términos de la cantidad de bombeo en contraste

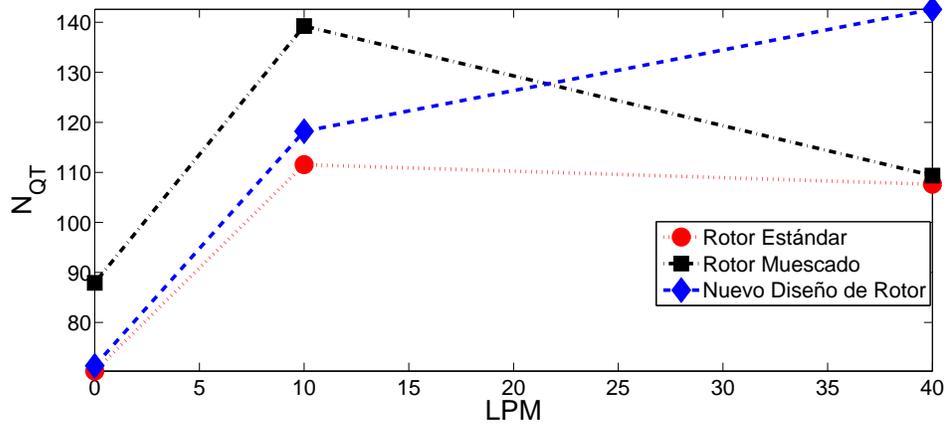


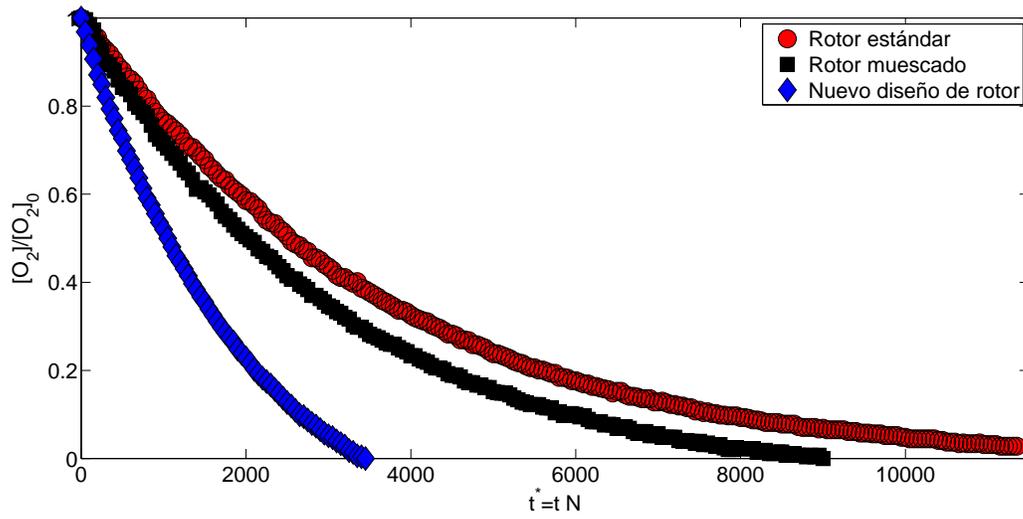
Figura 5.7: Número de bombeo para los diferentes rotores bajo diferentes condiciones de inyección de gas.

con los otros dos impulsores. En segundo lugar, este mismo rotor con muescas bajo altas cantidades de inyección, muestra una disminución sustancial en su capacidad de bombeo. Este es un comportamiento complemente diferente al que presenta la nueva geometría de rotor propuesta, en el que el bombeo no se ve afectado por el cambio en las condiciones de flujo de gas. De estas observaciones se puede inferir que ambos rotores comerciales se encuentran inundados, el aumento del flujo de gas genera la formación de grandes cantidades de burbujas alrededor de los agitadores. Estas burbujas cubren los rotores e impiden estas sean expulsadas eficientemente por el fluido hacia las paredes del contenedor. De esta manera, el bombeo es disminuido considerablemente. Lo anterior no ocurre en el nuevo diseño de rotor, esto es debido a que este agitador genera burbujas más pequeñas y genera una mejor distribución de estas en el tanque. Esta suposición puede corroborarse al observar el comportamiento de las burbujas en la Figura 5.1, en la primera sección de este capítulo. Por lo tanto, el nuevo diseño de rotor ha demostrado tener un mejor rendimiento bajo un amplio rango de tasas de inyección de gas en operaciones de desgasificación. Como se verá claramente en la siguiente sección en donde se analiza la respuesta de las curvas de desgasificado para las diferentes condiciones de gas, tanto para los rotores comerciales, así como para el nuevo diseño de rotor.

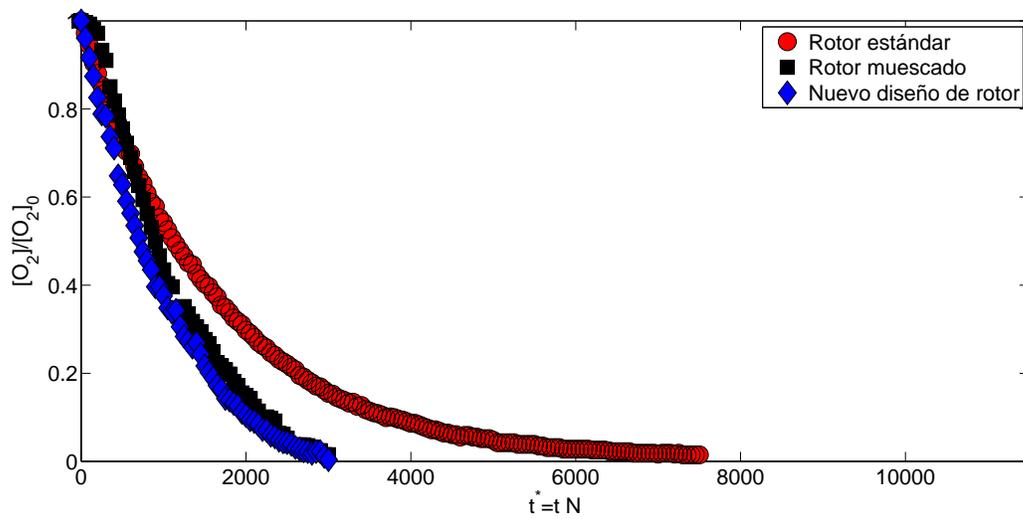
5.5. Cinética de desgasificado

En esta sección se analiza la influencia de la geometría de los diferentes arreglos de rotores-inyectores sobre la cinética de desgasificado. En la Figura 5.8, se muestra el cambio en la rapidez de desgasificación para los distintos rotores a dos diferentes tasas de inyección de gas, las mismas que fueron utilizadas en la obtención de los patrones de flujo (10 y 40 LPM) y a una velocidades de rotación de 600 rpm. Las curvas de cinética de desgasificación fueron normalizadas con respecto a la cantidad de oxígeno inicial ($[O_2]_0$), el tiempo de desgasificado se hizo adimensional con la velocidad de rotación de los agitadores ($t^* = tN$).

Para cuando se inyecta una baja cantidad de gas de purga, se puede observar que los rotores estándar y con muescas, presentan una tasa de desgasificación similar al principio de la operación, sin embargo después que se ha alcanzado una desgasificación de alrededor del 10%, el rotor estándar disminuye su eficiencia y su capacidad de eliminación de los gases disueltos es mucho menos en comparación al caso de los otros dos rotores, dicho rotor alcanza una desoxigenación completa después de alrededor 1130 segundos, mientras que el rotor muescado necesita de aproximadamente 900 segundos, lo cual representa cerca de un 20% en la rapidez final de desgasificado (Figura 5.8 a). Por otra parte, a esta baja tasa de inyección (10 LPM), cuando se observa el comportamiento del nuevo rotor, se muestra una cinética más rápida de desgasificación en el que la concentración de oxígeno disminuye gradualmente en el tiempo hasta 340 segundos, que es aproximadamente un 70 y 62% de reducción en el tiempo de procesamiento, en comparación para los rotores estándar y muescado, respectivamente, lo cual puede verse notarse en la Figura 5.8a). Estas diferencias están íntimamente relacionadas con la distribución y el tamaño de las burbujas generadas por cada una de las geometrías. A medida que se aumenta la cantidad de gas suministrada al sistema, conservando la misma velocidad de rotación de los impulsores, los tres rotores mejoran su desempeño, esto se observa claramente en la Figura 5.8b). A una alta inyección de gas (40 LPM) el rotor comercial estándar, llega a un estado de desgasificación completa a los 730 segundos, esto significa una mejora de hasta un 35% con respecto a su desempeño en comparación a una baja tasa de inyección de gas. En cuanto a los rotores con muescas y el nuevo diseño, se puede observar que presentan casi la misma velocidad de desgasificación en la mayor parte



(a)



(b)

Figura 5.8: Cinética de desgasificado para los tres impulsores empleados en este trabajo, a 600 rpm y ambas condiciones de gaseado: a) 10 LPM; b) 40 LPM.

de la curva, ambos exhiben un comportamiento similar, alcanzando una desoxigenación completa después de alrededor de 300 segundos (Figura 5.8 b). Esto representa una mejora substancial en su desempeño para ambos casos, para el rotor muescado hasta de un 67 %, mientras que para el nuevo diseño se obtuvo una optimización de ~ 12 %. Es notable que, al inicio del proceso de desgasificación, no se observa una diferencia importante, sin embargo, sin embargo, puede notarse un ligero aumento de la tasa de desoxigenación para el nuevo diseño de rotor durante todo el proceso de desgasificado. Por otra parte, el nuevo rotor muestra una cinética más rápida de desgasificación en el que la concentración de oxígeno disminuye gradualmente en el tiempo lo cual muestra la versatilidad en el uso de este rotor, al presentar una alta eficiencia en la remoción de gases disueltos para ambas tasas de inyección de gas. Sin lugar a dudas este es un resultado directo de la producción de burbujas más pequeñas por acción de dicho rotor, como puede observarse en la Figura 5.1. Como se ha mostrado anteriormente, este nuevo diseño de rotor acelera una mayor cantidad de fluido, generando mayores intensidades de turbulencia y aumentando la tasa de ruptura de las burbujas. Esta producción de burbujas más pequeñas, aumentan el área interfacial lo cual incrementa la capacidad de desgasificación.

Capítulo 6

Conclusiones

En las operaciones de desgasificado donde se utilizan sistemas de rotores-inyectores, se generan fenómenos complejos de transporte de masa y momento, los cuales influyen enormemente en el desempeño de estos sistemas. Por lo tanto, el entendimiento de la relación entre los campos de velocidad y la cinética de desgasificado es de enorme importancia. El objetivo de este estudio fue investigar la influencia de la geometría del rotor sobre las características de flujo en las operaciones de desgasificado de aluminio. Con este fin, se propuso un nuevo diseño de un dispositivo de rotor-inyector y fue comparado con dos diseños comerciales ampliamente usados para operaciones industriales. Se realizó un estudio experimental de la hidrodinámica generada por estos dispositivos, y se analizó su influencia sobre la rapidez de desgasificado a dos diferentes tasas de inyección de gas (10 - 40 LPM). Se observó que la geometría de los rotores define directamente el comportamiento de flujo y la inyección de gas afecta directamente a las características dinámicas en todos los sistemas. La obtención de las características hidrodinámicas del flujo se llevó a cabo empleando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). En los resultados obtenidos pudo observarse que los patrones de flujo para todos los casos bajo condiciones de no gaseado, que el flujo es principalmente radial y se observa la formación de zonas de recirculación a la altura de los rotores. Se observa la manera en como dichos patrones son modificados debido a las presencia de la fase dispersa, tanto para altas como bajas tasas de inyección de gas. Las modificaciones principales en los patrones de flujo se observaron para los casos de los agitadores comerciales, en los cuales se puede no-

tar la manera en como las zonas de recirculación disminuyen su tamaño, hecho que ocurre en menor medida para el caso del nuevo diseño de rotor, en el cual se observa que el perfil radial de velocidades y los tamaños de las recirculaciones se conservan independientemente de la cantidad de gas suministrada al sistema. Notándose de esta manera una transferencia de momento más eficiente en este rotor. Por otro lado, en los impulsores estudiados se aprecia que únicamente generan mezclado en las áreas cercanas a estos, provocando la formación de zonas poco agitadas en la parte superior del contenedor. Al introducir el gas en el contenedor, se propició la formación de burbujas pequeñas en la región inferior de los rotores, debido principalmente a fluctuaciones turbulentas que promueven la ruptura del gas. En el caso de los rotores comerciales se muestra una tendencia a aumentar las magnitudes de velocidad bajo condiciones de gasificación, sin embargo, lo que se observa con el nuevo diseño de rotor es un aumento substancial en sus valores, las cuales abarcan una mayor área. Se pudo notar que las diversas geometrías generan fuertes corrientes de fluido en dirección radial, las cuales contribuyen a la circulación de gas, mejorando el transporte de masa, evitando que las burbujas suban libremente a la superficie del recipiente. Con referencia a la capacidad de bombeo, se puede concluir que los tres rotores analizados en este trabajo, bajo condiciones de no gaseado, presentaron capacidades de bombeo mas altas en la dirección radial en comparación con la dirección axial. Sin embargo, para el caso cuando se inyecta aire dentro del contenedor, se observó un cambio considerable en la eficiencia del bombeo en todos ellos. Sin embargo, para cuando se tiene una alta tasa de inyección (40 LPM), es notable una disminución en el bombeo para los rotores comerciales, mientras que puede notarse una mejora para el caso del nuevo diseño de rotor. Lo anterior también beneficia a la circulación de las burbujas, provocando así, un aumento en los tiempos de residencia del gas.

Para las geometrías empleadas de los rotores se determinaron directamente las distribuciones espaciales y la intensidad de turbulencia. En los rotores analizados, se obtuvo que los niveles más altos de intensidad de turbulencia se localizan en la parte baja de los agitadores. Bajo condiciones de baja inyección de gas (10 LPM), tanto los rotores comerciales como el nuevo diseño, muestran una disminución en los perfiles turbulentos. Adicionalmente, se encontró que la intensidad de turbulencia más alta se presentó para el caso del nuevo diseño de rotor a pesar de una alta

tasa de inyección de gas, a diferencia de los otros casos, en los cuales, bajo condiciones de gasificado, los mapas de intensidad de turbulencia se ven substancialmente modificados, mostrándose una disminución considerable de su intensidad. En estos casos la intensidad de turbulencia, localizada en la parte baja de los impulsores, es mayormente disipada. Se puede inferir de las observaciones que esta disminución en las fluctuaciones de velocidad, es debida principalmente a la presencia de burbujas, las cuales son de mayor tamaño en contraste al caso del nuevo diseño de rotor. La energía turbulenta es absorbida por la superficie de las burbujas de mayor tamaño y a que estas no se dispersan por todo el contenedor. El análisis de los resultados obtenidos para el nuevo diseño de rotor indica que esta configuración presenta las mayores fluctuaciones de velocidad en una mayor zona con respecto a los otros agitadores. Tales fluctuaciones, generan una mayor ruptura de burbujas y a su vez incrementan la formación de burbujas más pequeñas; las cuales no son capaces de atenuar la turbulencia generada y por lo tanto aumentando la interacción entre la fase dispersa y el líquido. Las zonas de alta velocidad en la parte baja del nuevo rotor, generan regiones de baja presión, atrapando el gas en la parte baja del impulsor. Debido a este confinamiento y a las altas intensidades de turbulencia existe una mayor eficiencia en la interacción de las burbujas, prolongando el contacto con el líquido y por lo tanto mejorando los tiempos de residencia del gas. De este modo se confirma lo presentado en las curvas de rapidez de desgasificado, obtenidas por medio de las mediciones de oxígeno disuelto. En estas gráficas debe destacarse, en la comparación de los tres rotores, que el mejor desempeño se encuentra para el caso del nuevo diseño de rotor a altas tasas de inyección de gas y a altas velocidades de agitación. Además de esto, también se pone de manifiesto la relación existente entre la hidrodinámica del flujo con la eficiencia del proceso de desgasificación. La comparación realizada en este trabajo demuestra la manera en la cual los campos de velocidad influyen en la eficiencia del proceso de desgasificado acelerando su cinética. Pudo observarse de los resultados presentados aquí, que el nuevo diseño de rotor exhibe un mejor rendimiento en una amplia gama de tasas de inyección de gas. Por lo que se produce una mejora en la tasa de transferencia de masa en este tipo de sistemas. Así también el presente trabajo, muestra la importancia de la generación de altas intensidades de turbulencia en una olla de desgasificado, con todo esto se

obtiene una evidencia de los parámetros principales que son necesarios para realizar un diseño óptimo de dispositivos de rotor-inyector en la industria de refinación de aluminio.

Bibliografía

1. Adrian, R.J., Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annual review of fluid mechanics, 1991. 23(1), p. 261-304.
2. Ambat, R. y Dwarakadasa, E., Effect of hydrogen in aluminium and aluminium alloys: A review. Bulletin of Materials Science, 1996. 19(1), p. 103-114.
3. Anyalebechi, P., Talbot, D., y Granger, D., The solubility of hydrogen in liquid binary Al-Li alloys. Metallurgical and Materials Transactions B, 1988. 19(2), p. 227-232.
4. Anyalebechi, P.N., Attempt to predict hydrogen solubility limits in liquid multicomponent aluminum alloys. Scripta Materialia, 1996. 34(4), p. 513-517.
5. Ashby, M.F., Physical modelling of materials problems. Materials Science and Technology, 1992. 8(2), p. 102-111.
6. Birnbaum, H.K., Buckley, C., Zeides, F., Sirois, E., Rozenak, P., Spooner, S., y Lin, J.S., Hydrogen in aluminum. Journal of Alloys and Compounds, 1997. 253-254(0), p. 260-264.
7. Brown, J.R., Foseco non-ferrous foundryman's handbook. 11th ed. 1999, Oxford, England ; Boston: Butterworth-Heinemann. p XIII, 296 p.
8. Camacho-Martínez, J.L., Ramírez-Argáez, M., Zenit-Camacho, R., Juárez-Hernández, A., Barceinas-Sánchez, O., y Trápaga-Martínez, G., Physical Modelling of an Aluminium Degassing Operation with Rotating Impellers: A Comparative Hydrodynamic Analysis. Materials and Manufacturing Processes, 2010. 25(7), p. 581-591.

-
9. Camacho-Martínez, J.L., Ramírez-Argáez, M.A., Juárez-Hernández, A., González-Rivera, C., y Trápaga-Martínez, G., Novel Degasification Design for Aluminum Using an Impeller Degasification Water Physical Model. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012. 27(5), p. 556-560.
 10. Chen, J.J.J. y Zhao, J.C., Bubble Distribution in a Melt Treatment Water Model, in *Light Metals 1995*, J. Evans, Editor. 1995, The Minerals, Metals and Materials Society. p. 1227-1231.
 11. Chen, X.G., Klinkenberg, F.J., y Engler, S., Optimization of the Impeller Degassing Process Through Continuous Hydrogen Measurement, in *Light Metals 1995*, J. Evans, Editor. 1995, The Minerals, Metals and Materials Society. p. 1215-1222.
 12. Cruz Méndez, W.F., Modelo cinético y termodinámico de la desoxidación aplicado a un modelo físico del proceso de desgasificación con rotor-inyector. 2013, Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad Universitaria, Facultad de Química. p. 93.
 13. Dantzig, J., Clumpner, J., y Tyler, D., Degassing of static melts by insoluble purge gases. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1980. 11(3), p. 433-438.
 14. Engh, T.A. y Pedersen, T., Removal Hydrogen from Molten Aluminium by Gas Purging, in *Light Metals 1984*, M. Geer, Editor. 1984, The Minerals, Metals & Materials Society: Warrendale, Pa. p. 1329-1344.
 15. Engh, T.A. y Sigworth, G.K., Molten Aluminium Purification, in *Light Metals 1982*, J.E. Andersen, Editor. 1982, The Minerals, Metals & Materials Society: Dallas. p. 983-1001.
 16. Engh, T.A., Simensen, C.J., y Wijk, O., *Principles of metal refining*. Oxford science publications. 1992, Oxford ; New York: Oxford University Press. p. XXX, 473 p.

17. Geiger, G.H. y Poirier, D.R., *Transport phenomena in metallurgy*. Addison-Wesley series in metallurgy and materials. 1973, Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co. p XXI, 616 p.
18. Gómez, E.R., Zenit, R., Rivera, C.G., Trápaga, G., y Ramírez-Argáez, M.A., *Physical Modeling of Fluid Flow in Ladles of Aluminum Equipped with Impeller and Gas Purging For Degassing*. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013. 44(4), p. 974-983.
19. Griffiths, W. y Raiszadeh, R., *Hydrogen, porosity and oxide film defects in liquid Al*. *Journal of Materials Science*, 2009. 44(13), p. 3402-3407.
20. Hernández Hernández, M., *Estudio de la cinética de desgasificación de aluminio con rotor inyector variando el punto de inyección de gas y el diseño del rotor asistido por modelado matemático y planta piloto*, Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, 2015. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 130.
21. Hernández-Hernández, M., Camacho-Martínez, J.L., González-Rivera, C., y Ramírez-Argáez, M.A., *Impeller design assisted by physical modeling and pilot plant trials*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016. 236, p. 1-8.
22. Hernández-Hernández, M., Cruz-Méndez, W., González-Rivera, C., y Ramírez-Argáez, M.A., *Effect of Process Variables on Kinetics and Gas Consumption in Rotor-Degassing Assisted by Physical and Mathematical Modeling*. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015. 30(2), p. 216-221.
23. International Aluminium Institute. *Primary Aluminium Production*. 2017. (consultado 2017 Mayo); <http://www.world-aluminium.org/statistics/>.
24. Johansen, S.T., Graadahl, S., Tetlie, P., Rasch, B., y Myrbostad, E., *Can Rotor-based Refining Units be Developed and optimised Based on Water Model Experiments?*, in *Light Metals 1998*, B. Welch, Editor. 1998, The Minerals, Metals & Materials Society. p. 805-810.

-
25. Johansen, S.T., Grådahl, S., Dahle, Ø., Johansen, I.R., Tangen, R., y Myrbostad, E., Experimental determination of bubble sizes in melt refining reactors, in TMS Annual Meeting, TMS, Editor. 1996, TMS: Los Angeles. p. 1-11.
 26. Kaufman, J.G., Rooy, E.L., y American Foundry Society., Aluminum alloy castings : properties, processes, and applications. 2004, Materials Park, OH: ASM International. p VIII, 340 p.
 27. Linder, J., Axelsson, M., y Nilsson, H., The influence of porosity on the fatigue life for sand and permanent mould cast aluminium. *International Journal of Fatigue*, 2006. 28(12), p. 1752-1758.
 28. Lumley, R., *Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, processing and applications*. 2011, Cambridge: Woodhead Publishing. p 843.
 29. Mazumdar, D. y Guthrie, R.I.L., *The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems*. *ISIJ International*, 1995. 35(1), p. 1-20.
 30. Mi, G., Qi, S., Liu, X., y Niu, J., Research on water simulation experiment of the rotating impeller degassing process. *Materials Science and Engineering: A*, 2009. 499(1-2), p. 195-199.
 31. Neff, D.V., Understanding aluminum degassing. *Modern Casting*, 2002. 95(5), p. 24-26.
 32. Ni, H., Sun, B., Jiang, H., y Ding, W., Effects of rotating impeller degassing on microstructure and mechanical properties of the A356 scraps. *Materials Science and Engineering: A*, 2003. 352(1-2), p. 294-299.
 33. Nienow, A.W., *Stirred Tank Reactors*, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2000, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
 34. Oldshue, J.Y., *Mixing*. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1970. 62(11), p. 44-51.
 35. Ramírez-Argáez, M.A., *Numerical Simulation of Fluid Flow and Mixing in Gas-Stirred Ladles*. *Materials & Manufacturing Processes*, 2008. 23(1), p. 59-68.

36. Ramos-Gómez, E.A., Modelado físico y matemático del desgasificado de aluminio líquido equipado con rotor-inyector, Facultad de Química. 2011, Universidad Nacional Autónoma de México: México. p. 101.
37. Ransley, C.E. y Neufeld, H., The solubility of hydrogen in liquid and solid aluminium. *Journal of the Institute of Metals*, 1948. 74(12), p. 599-620.
38. Samuel, A.M. y Samuel, F.H., Various aspects involved in the production of low-hydrogen aluminium castings. *Journal of Materials Science*, 1992. 27(24), p. 6533-6563.
39. Saternus, M. y Botor, J., Physical Model of Aluminium Refining Process in the Batch and Continuous Reactors. *Materials Science Forum*, 2010. 654 - 656, p. 1553-1556.
40. Schlesinger, M., Aluminum recycling. 2007, Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group. p 225 p.
41. Sieverts, A., Die Aufnahme von Gasen durch Metalle. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1929. 21, p. 37-46.
42. Sigworth, G. y Wang, C., Evolution of porosity in long freezing range alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1993. 24(2), p. 365-377.
43. Sigworth, G.K., Practical Degassing of Aluminum. *Modern Casting*, 1988. 78(3), p. 42-44.
44. Sigworth, G.K. y Engh, T.A., Chemical and kinetic factors related to hydrogen removal from aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1982. 13(3), p. 447-460.
45. Talbot, D.E.J. y Anyalebechi, P.N., Solubility of hydrogen in liquid aluminium. *Materials Science and Technology*, 1988. 4(1), p. 1-4.
46. Tatterson, G.B., Fluid mixing and gas dispersion in agitated tanks. 1991, New York: McGraw-Hill. p XI, 548 p.

47. Tatterson, G.B., Scaleup and design of industrial mixing processes. 1994, New York: McGraw-Hill. p XIII, 312 p.
48. Tovio, D.O., Mugica, G.W., González, A.C., y Cuyás, J.C., Formation and Size of Bubbles in Degassing System of Aluminum Alloys. AFS Transactions, 2000. 108, p. 457-462.
49. Warke, V.S., Removal of Hydrogen and Solid Particles from Molten Aluminum Alloys in the Rotating Impeller Degasser: Mathematical Models and Computer Simulations, in Materials Science & Engineering. 2003, Worcester Polytechnic Institute: Worcester, Massachusetts. p. V, 67.
50. Xu, H., Jian, X., Meek, T.T., y Han, Q., Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration. Materials letters, 2004. 58(29), p. 3669-3673.
51. Zhang, L., Lv, X., Torgerson, A.T., y Long, M., Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum: A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2011. 32(3), p. 150-228.
52. Zhang, L. y Taniguchi, S., Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. International Materials Reviews, 2000. 45(2), p. 59-82.