

Estudio Hidrodinámico de Rotores-Inyectores sobre la Cinética de Desgasificado de Aluminio

Ernesto Mancilla**, Isaías E. Garduño^a, Wiener F. Cruz-Méndez^b, Carlos González-Rivera^b, Marco Aurelio Ramírez-Argáez^b, Gabriel Ascanio^a

^aCentro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México
 Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México

^bDepartamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México
 Av. Universidad 3000, Ciudad de México, México

*Autor contacto. Correo electrónico: ernesto.mancilla@ccadet.unam.mx

Resumen

En este estudio se analiza experimentalmente la influencia de la hidrodinámica de un nuevo rotor sobre la cinética de desgasificado en un modelo físico de agua para un sistema de refinación de aluminio. El desempeño de un nuevo diseño de rotor fue comparado contra dos diseños comerciales ya existentes en la industria. Se empleó un sistema de velocimetría por imágenes de partículas para obtener los campos de velocidad, demostrando la influencia de la hidrodinámica sobre las curvas de desgasificado bajo condiciones reales de operación. Se pudo observar que el nuevo diseño de rotor propuesto genera intensidades de turbulencia mayores en comparación con los impulsores comerciales. En consecuencia, el efecto principal se observa en el proceso de desgasificación, lo cual promueve una aceleración en los tiempos de desgasificado y por lo tanto aumentando la eficiencia del proceso.

Abstract

In this study, the influence of the hydrodynamics of a novel rotor, over the degassing kinetics in a physical water model, is experimentally analyzed for an aluminum refining system. The performance of this novel rotor design is contrasted against two commercial devices used in the industry. Here, a particle image velocimetry system is used in order to obtain the velocity fields, demonstrating the influence of the hydrodynamics, over the degassing curves, under real industrial operational conditions. The results of this new rotor design show the production of higher turbulence intensities compared to commercial impellers. In consequence, the main effect is observed in the degassing process, whereby acceleration in the degassing time is promoted. Hence, the process efficiency is increased.

Palabras clave:

Aluminio, proceso de desgasificado, intensidad de turbulencia, rotor-inyector

Keywords:

Aluminum, degassing process, turbulence intensity, rotor-injector

Nomenclatura

PIV, velocimetría por imágenes de partículas

LPM, litros por minuto (L/min)

IT, intensidad de turbulencia (-)

v'_i , fluctuación de velocidad en la componente i (m/s)

H, altura del líquido (cm)

D, diámetro del contenedor (cm)

N, velocidad de rotación del impulsor (rps)

d, diámetro del rotor (cm)

Introducción

En la actualidad, una de las operaciones unitarias con mayor relevancia en la industria metalúrgica son aquellas que se refieren al proceso de deshidrogenación de aluminio fundido

[1]. La existencia de gas en una aleación de aluminio da lugar a la presencia de defectos y con ello a una mala calidad del producto final [2]. Por ello en la última década se han desarrollado diversos métodos que permiten la obtención de aleaciones de alta calidad. Dentro de las metodologías empleadas para este efecto, está el uso de sistemas agitados mecánicamente; en los cuales el gas de desgasificado se inyecta por medio de diversos métodos. Algunos de estos métodos de inyección suelen emplear principalmente: tapones porosos, lanzas, boquillas; entre otros [3]. Uno de los métodos con mayor aceptación en la industria de desgasificación es el método de rotor-inyector, este método ha sido probado como el medio más eficaz para obtener los resultados deseados en los procesos de aluminio [4-6]. En estos sistemas, el gas se inyecta a través del eje del impulsor y la velocidad del rotor promueve el contacto gas-líquido; obteniendo con ello una buena dispersión de las burbujas y mejorando el tiempo

de residencia del gas, por lo tanto mejorando el mezclado y acelerando la cinética de desgasificación. Las características hidrodinámicas del flujo generado por estos rotores juegan un papel importante en el rendimiento de estos sistemas de mezclado. Por tal motivo, la geometría del impulsor es uno de los parámetros críticos en la calidad y el volumen de la producción final. En este sentido, en algunas investigaciones han explorado las configuraciones geométricas que se deben utilizar en este tipo de operaciones. Zang et al. [7] investigaron la influencia de diversas configuraciones geométricas de impulsores, así como también la velocidad angular crítica a la cual se obtenía un mezclado óptimo. También se han realizado otros estudios, acerca del modelado físico en tanques de agua escalados 1:1, en referencia a procesos industriales reales. En ellos se observó el comportamiento hidrodinámico, analizando los patrones de flujo y la dispersión de gas en el líquido [8-11]. En estos trabajos se reconoció la importancia de diversos parámetros, tales como: la tasa de inyección de gas, la geometría del impulsor, la velocidad de rotación del impulsor, entre otros [12, 13]. Claramente, el régimen de flujo impuesto por la geometría del impulsor afecta la naturaleza del flujo y el mezclado dentro del tanque. Debido a la circulación del flujo producido por el rotor, el gas se dispersa en la olla de colada, y las pequeñas burbujas se forman con el fin de aumentar el área interfacial y con ello mejorar el proceso de desgasificación. Una selección incorrecta de la geometría del rotor, evitará la formación de burbujas pequeñas de gas y provocará una pobre circulación de estas. Esto puede causar estados de dispersión indeseados, los cuales han sido identificados en investigaciones anteriores [14]. Una de estas situaciones es el llamado ‘inundamiento’ de los impulsores. Dicho estado describe la falta de dispersión de gas, en la cual se forman burbujas grandes y estas se elevan a lo largo del eje del impulsor, evitando que las burbujas sean dispersadas en el flujo y con ello la transferencia de masa. Por ello es necesario realizar una descripción hidrodinámica completa y conocer la influencia que ésta tiene sobre la eficiencia de desgasificado. La calidad y bajo costo de los procesos de aluminio depende directamente de la eficiencia en el escalamiento de los sistemas de desgasificación. En este trabajo, un modelo físico de agua escalado 1:1, fue construido para emular un proceso de desgasificación de aluminio industrial. La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés), fue empleada para adquirir los campos de velocidad y con ello estudiar las características turbulentas del flujo generado. Dos diseños comerciales de rotor-inyector utilizados en la industria fueron empleados para evaluar su rendimiento hidrodinámico en igualdad de condiciones de gasificación con un nuevo diseño de rotor. El método de inyección de gas convencional se utilizó para suministrar la tasa de inyección de gas. Se examinó la correlación entre las características turbulentas del flujo con la rapidez de la cinética de desgasificación de un modelo de agua de un proceso de refinación de aluminio. La atención se centra en el cambio en los patrones de flujo turbulento debido a la inyección de gas. El objetivo de este estudio es el de obtener una descripción completa del com-

portamiento de flujo global en tales sistemas, evaluando su efecto sobre la tasa de desgasificación.

Desarrollo experimental

Las mediciones experimentales fueron realizadas en un modelo físico de agua de un sistema de desgasificado de aluminio. 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 evitar los índices de refracción y evitar distorsiones ópticas debido a la curvatura del tanque. Tanto el tanque cilíndrico como el contenedor cuadrado se llenaron con agua. Tres arreglos de rotores-inyectores fueron analizados en este estudio, el diámetro de estos rotores fue de 17 cm, lo cual fija una relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque de $d/D \approx 1/3$, estos rotores han sido descritos detalladamente en otros trabajos [15, 16] y se muestran en la Fig. 1.

La nueva propuesta de rotor presentado en este trabajo consiste en un disco el cual está provisto en su parte inferior de aspas anchas (como se muestra en la Fig. 1), dichas aspas se encuentran en un ángulo de 45° , el modo de operación es el llamado up-pumping o con descarga hacia arriba, por lo cual se genera una región de baja presión en la zona inferior del rotor con lo cual logra arrastrar el fluido que se encuentra en la parte baja del contenedor, generando una remoción del fluido del fondo, evitando zonas de estancamiento, dicho fluido es inyectado nuevamente hacia las paredes del contenedor provocando con esto una buena circulación del fluido en esta región, además de esto, debido a dicha configuración geométrica, este rotor también es capaz de generar altas intensidades de turbulencia, la combinación de ambos efectos provoca la formación de burbujas más pequeñas de gas, además de promover una mayor tiempo de contacto entre ambas fases, este comportamiento es benéfico para la transferencia de masa, mejorando con ello la eficiencia del desgasificado dentro del sistema.

Los experimentos se llevaron a cabo a una velocidad de rotación del rotor de 400 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). La fase gaseosa fue introducida dentro del contenedor por medio del método convencional, el cual consiste en inyectar el gas a través de la flecha del impulsor. La tasa de inyección de gas fue fijada a 40 L/min, y fue controlada cuidadosamente por medio de un flujómetro, es importante mencionar que este flujo es una condición de operación industrial. Para evaluar las características hidrodinámicas del sistema se empleó la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. El sistema fue sembrado con partículas trazadoras de poliamida de 50 μm de diámetro, recubiertas de rodamina B (Dantec Dynamics).

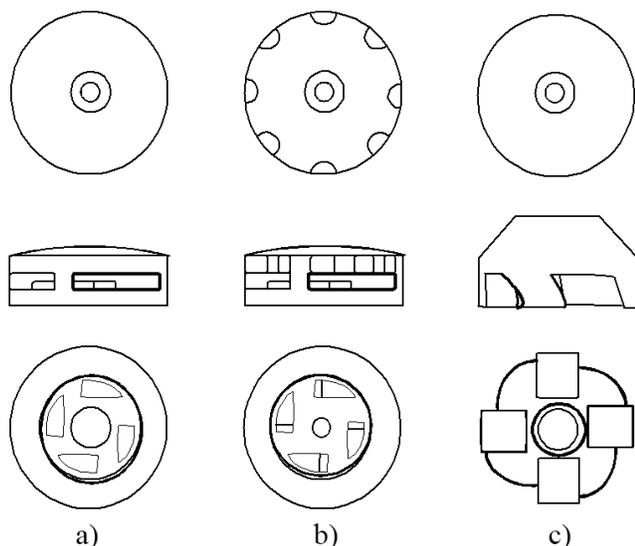


Figura 1. Rotores inyectoros. a) rotor estándar, b) rotor muescado, c) nuevo diseño.

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 llevaron a cabo con el software Dynamic Studio Ver. 4.0.37 (Dantec Dynamics). Las mediciones se realizaron en el plano axial en el centro del contenedor. En cada campaña experimental, 800 pares de imágenes fueron adquiridas con el fin de obtener un promedio robusto. La Fig. 2, muestra el arreglo experimental, el cual consiste en un tanque, un rotor-inyector, el sistema de velocimetría y un medidor de oxígeno. La cinética de desgasificado del aluminio fundido fue modelado utilizando oxígeno para saturar agua, se inyectó aire dentro del contenedor hasta alcanzar un estado saturado (6 ppm de O₂). 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 (40 LPM). La inyección de nitrógeno fue a través de la flecha del impulsor y dos velocidades de agitación fueron utilizadas (290 y 580 rpm), esto con el objetivo de observar la influencia de la velocidad del rotor 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).

Resultados

Intensidad de turbulencia

En operaciones de mezclado gas-líquido, e.g. un sistema de desgasificado de aluminio, es importante cuantificar el grado de agitación generado debido a la acción del impulsor. Como se mencionó anteriormente, las características hidrodinámicas del flujo generado son importantes en la eficiencia de transferencia de masa en sistemas de depuración de aluminio, en particular en sistemas de desgasificación en los cuales se utilizan rotores-inyectoros, ya que éstos generan un flujo altamente complejo.

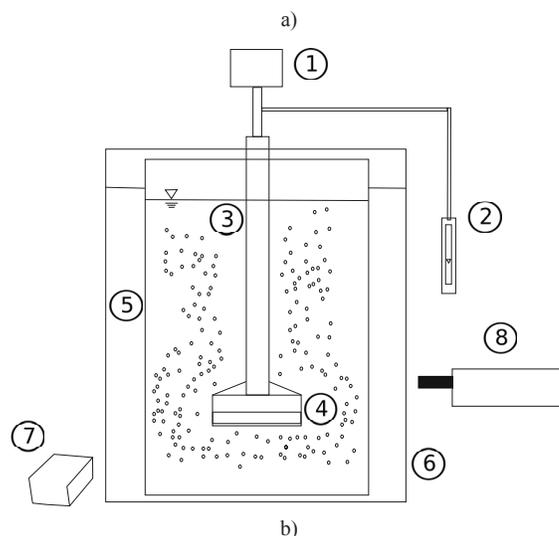
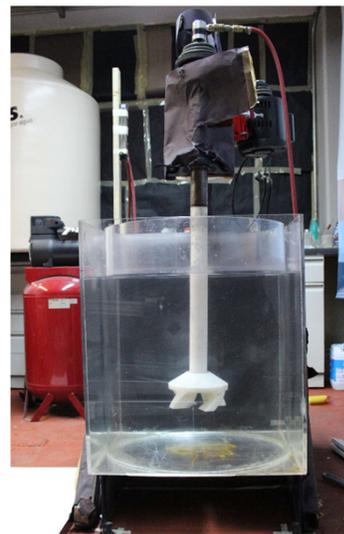


Figura 2. Arreglo experimental. a) Fotografía del modelo físico, b) Descripción esquemática de los diferentes componentes de sistema de medición. 1) motor; 2) eje del impulsor; 3) rotor-inyector; 4) tanque; 5) flujómetro de gas; 6) medidor de oxígeno disuelto; 7) contenedor cuadrado; 8) cámara de alta velocidad; 9) láser pulsado.

En esta sección se analiza la influencia de los impulsores sobre la eficiencia de mezclado y se estudian por medio de las características turbulentas del flujo. Se presenta el análisis de la intensidad de turbulencia (IT), la cual representa una medida directa del grado de agitación generada en un tanque de mezclado. La intensidad de turbulencia fue calculada a partir de los campos de velocidad y es expresada de la siguiente manera [17, 18]:

$$IT = \frac{\sqrt{v_x'^2 + v_y'^2}}{Nd} \quad (1)$$

En donde v_x' y v_y' son las fluctuaciones de velocidad en las direcciones radial y axial, respectivamente, N es la velocidad de rotación del rotor y d es el diámetro del impulsor. La escala de color indica la intensidad de turbulencia. Se debe notar que todos los mapas tienen la misma escala, esto para

obtener una mejor descripción de las características del flujo. En los resultados presentados aquí, se muestran los mapas de intensidad de turbulencia en una sola fase con fines comparativos y así poder observar la respuesta de los campos de intensidad de turbulencia debido a la presencia de gas. El análisis de los campos turbulentos en una sola fase para las distintas geometrías se muestra en la Fig. 3 (a, b, c), para los rotores estándar, muescado y el nuevo diseño, respectivamente. En estos mapas se muestra, que las mayores intensidades de turbulencia están situadas en zonas cercanas al rotor, en las cuales los máximos valores se encuentran en la parte inferior del impulsor. Estas regiones de alta intensidad de turbulencia corresponden a las zonas en donde las corrientes de fluido son expulsadas por los rotores, las cuales promueven el mezclado en estas zonas. Además, es claro que todos los rotores para el caso de una sola fase, presentan contornos de intensidad de turbulencia similares, además de que la magnitud de las fluctuaciones de velocidad tiene aproximadamente el mismo valor para todos ellos, lo cual resulta interesante debido a las notables diferencias geométricas de cada uno de ellos. Por otro lado, en el rotor muescado (rotor B) se observa un pequeño incremento en la magnitud de las fluctuaciones turbulentas y un ligero aumento en el tamaño de la región afectada, la cual podría considerarse despreciable (Fig. 3b). Para el caso bifásico, en el cual se introduce el gas dentro del contenedor a través de la flecha, se puede observar que los mapas de intensidad de turbulencia fueron drásticamente modificados, el grado de agitación disminuye para todos los casos, como se muestra en la Fig. 4. Debe notarse que para el campo de velocidades fluctuantes del rotor estándar, los altos gradientes de velocidad que se desarrollan

en la parte baja del rotor se disipan completamente al introducir altos flujos de gas (Fig. 4a).

Por otro lado, es notable un comportamiento similar al caso del rotor muescado (Fig. 4b), en donde se puede observar que debido a la inyección del gas la naturaleza turbulenta del flujo se reduce en gran medida, se nota claramente como el tamaño de la zona turbulenta se reduce drásticamente y su intensidad decrece aproximadamente en un 50%. Por otro lado, al analizar el campo de turbulencia cuando se introduce la fase gaseosa para el nuevo diseño de rotor, puede notarse que el rango de intensidad de turbulencia es del mismo orden que para el caso de una sola fase, además de esto, una ligera disminución del área turbulenta se presenta (Fig. 4c).

Lo anterior es un resultado directo de la presencia del gas, los rotores comerciales no son capaces de manejar una alta tasa de inyección de gas, por lo cual se encuentran ‘inundados’, esto es que la energía de los rotores no puede ser transferida al medio, evitando una tasa de ruptura de gas adecuada. Por esto, en estos casos se generaran burbujas de mayor tamaño, como ha sido observado en trabajos anteriores [19]. Para el nuevo diseño de rotor, el gas está atrapado en el área debajo del impulsor; debido a este confinamiento y las altas intensidades de fluctuaciones de velocidad, las burbujas interactúan con el líquido de una manera más eficiente y prolongada. A diferencia de los casos de los rotores comerciales, cuando se introduce el gas en el recipiente, los patrones se modifican sustancialmente debido a la intensidad de turbulencia y ésta se disipa completamente en el área inferior del recipiente. Para el caso del nuevo diseño de rotor, podemos decir que es aquí en donde se mantiene un alto nivel de turbulencia,

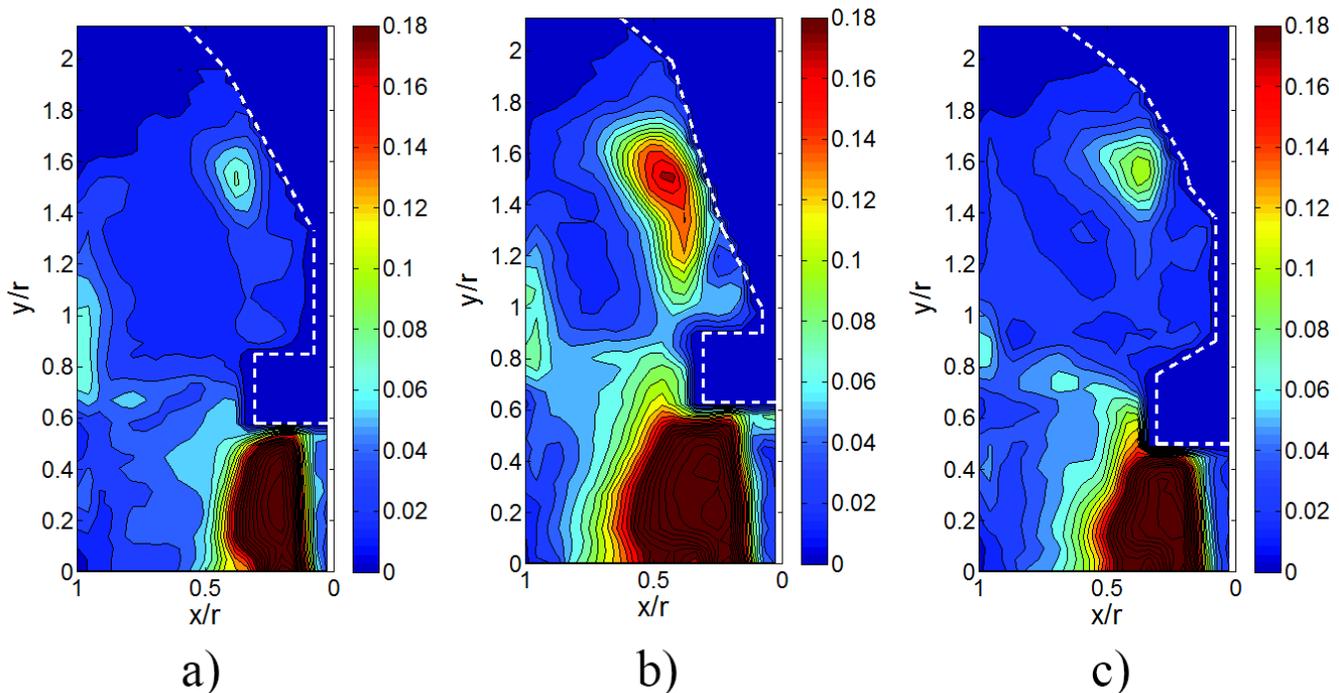


Figura 3. Contornos de intensidad de turbulencia en una sola fase para las tres geometrías de rotores.

a) rotor estándar; b) rotor muescado; c) nuevo diseño.

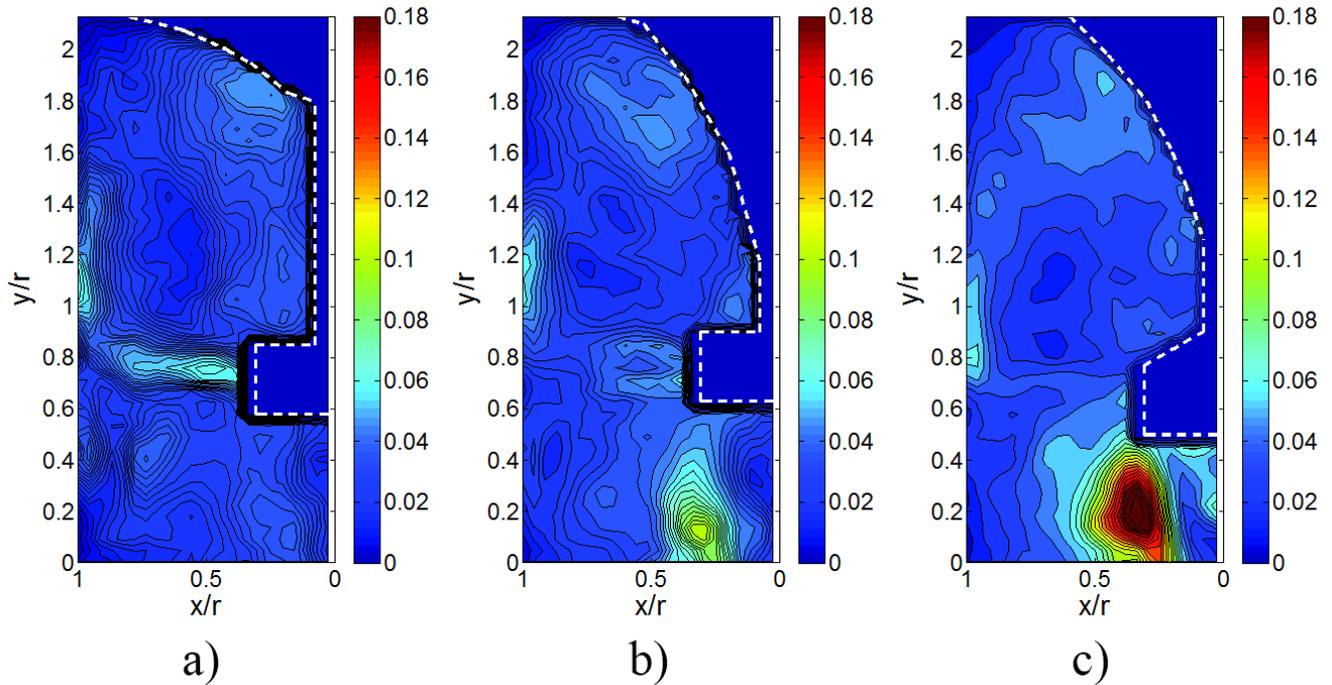


Figura 4. Contornos de intensidad de turbulencia para el caso gaseado (40 LPM) para las tres geometrías de rotores.

a) rotor estándar; b) rotor muescado; c) nuevo diseño

con lo cual es posible generar burbujas de menor tamaño, las cuales son dispersadas por el fluido desplazado, evitando con esto la ‘inundación’ del rotor. Es en esta región en donde se promueve la interacción de las diferentes capas de fluido con la fase dispersa, lo cual tendrá una influencia directa en la cinética de desgasificado. Se puede observar que para todos los casos mostrados aquí, en el resto del contenedor se encuentran regiones en las que la influencia del rotor es mínima por lo que no se observan zonas de recirculación y no existen regiones con un buen grado de mezclado.

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 Fig. 5, se muestra el cambio en la rapidez de desgasificado para los distintos rotores a dos velocidades de rotación, a la misma tasa de inyección de gas utilizada en la obtención de los patrones de flujo (40 LPM). Se puede observar que los rotores estándar y con muescas, presentan casi la misma velocidad de desgasificación, alcanzando una desoxigenación completa después de alrededor de 880 segundos (Fig. 5a). Es notable que al inicio del proceso de desgasificación, no se observa una diferencia importante, sin embargo después de casi 100 s, se presenta un aumento de la tasa de desoxigenación para el nuevo diseño de rotor. 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 hasta 580 s, que es aproximadamente un 33% de reducción en el tiempo de procesamiento. Estas diferencias están íntimamente relacionadas con la distribución y el tamaño de las burbujas. A medida que se aumenta la velocidad de rotación de los impulsores, los tres rotores mejoran

su desempeño, esto se observa claramente en la Fig. 5b. A una alta velocidad de rotación el rotor comercial estándar, llega a un estado de desgasificación completa a los 330 s, mientras que para el rotor muescado la cinética de desgasificado es ligeramente más rápida, de aproximadamente 270 s. Por otra parte, el nuevo diseño de rotor completa el proceso de desoxigenación en 225 s. Estos resultados representan un 32% y un 18% en la reducción de tiempo en referencia a los rotores estándar y muescado, respectivamente. Esto es un resultado directo de la producción de burbujas más pequeñas por acción de los rotores. A medida que la velocidad de rotación se incrementa los rotores aceleran una mayor cantidad de fluido, generando mayores intensidades de turbulencia y provocando la ruptura de las burbujas. Esta producción de burbujas más pequeñas, con las cuales se aumenta el área interfacial, incrementa la capacidad de desgasificación. Por lo tanto, la cinética de desgasificación es más rápida para el nuevo diseño de rotor a ambas velocidades rotación, lo cual muestra la flexibilidad de este novedoso diseño para diferentes operaciones de desgasificación.

Conclusiones

En las operaciones de desgasificado donde se utilizan sistemas de rotores-inyectores, se generan fenómenos complejos de transporte de masa 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. En este estudio se investigó la influencia de la geometría del rotor sobre las características de flujo en las operaciones de desgasificación. Además, se presentó un estudio experimental de la hidrodinámica generada por tres dispositivos de rotor-inyector provistos con

diferentes geometrías y se analizó su influencia sobre la rapidez de desgasificado a una alta tasa de inyección de gas (40 LPM). La obtención de las características hidrodinámicas del flujo se llevó a cabo empleando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. 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. Por otro lado, en los impulsores estudiados se aprecia que únicamente generan mezclado en las áreas cercanas a estos, provocando la formación de zonas muertas 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. Adicionalmente, se encontró que la intensidad de turbulencia más alta se presentó para el caso del nuevo diseño de rotor a pesar de la alta tasa de inyección de gas, a diferencia de los otros casos. Para los casos de los rotores comerciales (estándar y muescado) en los cuales el gas se introdujo dentro del contenedor, los mapas de intensidad de turbulencia se ven substancialmente modificados. 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 debido principalmente a la presencia de burbujas, las cuales son de mayor tamaño en contraste al caso del nuevo diseño de rotor. El análisis de los resultados obtenidos para el nuevo diseño de rotor indica que esta configuración presenta las más altas fluctuaciones de velocidad. 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 diferentes 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. Finalmente, es necesario realizar una caracterización completa de las características turbulentas que se presentan en este tipo de flujos, de esta manera obtener un mejor entendimiento de los procesos de transferencia de masa relacionados con las operaciones de desgasificación de aluminio, equipados con rotores-inyectores. Lo anterior principalmente, con el fin de encontrar los parámetros fundamentales para obtener un escalamiento exitoso de este tipo de sistemas.

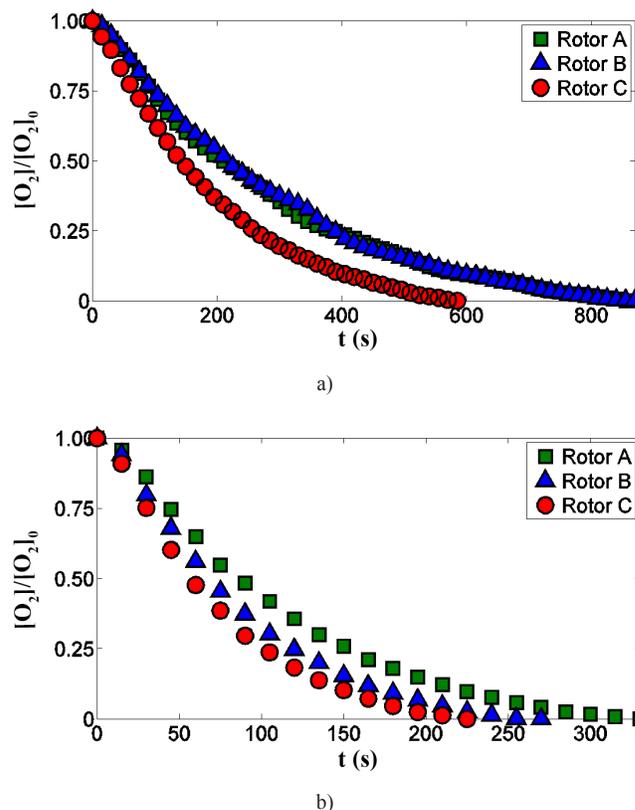


Figura 5. Cinética de desgasificado para los tres impulsores a 40 LPM; a) 290 rpm, b) 580 rpm.

Referencias

- [1] T. Engh, *Principles of metal refining*, Oxford University Press, Oxford, UK 1992, pp. 473.
- [2] G. Mi, S. Qi, X. Liu, J. Niu, *Research on water simulation experiment of the rotating impeller degassing process*, Materials Science and Engineering: A, 499 (2009) 1.
- [3] M.C. Díaz, S.V. Komarov, M. Sano, *Bubble behaviour and absorption rate in gas injection through rotary lances*, The Iron and Steel Institute of Japan International, 37 (1997) 1.
- [4] G.F. Mi, X.Y. Liu, K.F. Wang, S.P. Qi, H.W. Wang, J.T. Niu, *Analyses of the influencing factors of rotating impeller degassing process and water simulation experiment*, Materials Science Forum 575 (2008).
- [5] E.R. Gómez, R. Zenit, C.G. Rivera, G. Trápaga, M.A. Ramírez-Argáez, *Physical modeling of fluid flow in ladles of aluminum equipped with impeller and gas purging for degassing*, Metallurgical and Materials Transactions B, 44 (2013) 4.
- [6] J.L. Camacho-Martínez, M.A. Ramírez-Argáez, R. Zenit-Camacho, A. Juárez-Hernández, J.O. Barceinas-Sánchez, G. Trápaga-Martínez, *Physical modelling of an aluminium degassing operation with rotating impellers – A comparative hydrodynamic analysis*, Materials and Manufacturing Processes, 25 (2010) 7.

- [7] L. Zhang, S. Taniguchi, K. Matsumoto, *Water model study on inclusion removal from liquid steel by bubble flotation under turbulent conditions*, Ironmaking & Steelmaking, 29 (2002) 5.
- [8] L. Zhang, X. Lv, L. N. Wiredu Damoah, C. Bai, *Mathematical modeling on the removal of impurity elements from molten aluminum*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 33 (2012) 1.
- [9] S.T. Johansen, S. Graadahl, P. Tetlie, B. Rasch, E. Myrbostad, *Can rotor based refining units be developed and optimized based on water model experiments*, Light Metals, (1998) pp. 805–810.
- [10] B. Hop, E. Frisvold, B. Rasch, S.T. Johansen, *The fluid mechanics in the H110 Hycast reactor*, Light Metals, (1997) pp. 837–841.
- [11] F. Chiti, A. Paglianti, W. Bujalski, *A mechanistic model to estimate power consumption and mixing time in aluminium industries*, Chemical Engineering Research and Design, 82 (2004) 9.
- [12] M. Nilmani, P.K. Thay, C.J. Simensen, *Gas fluxing operation in aluminium melt refining laboratory and plant investigations*, Light Metals, 946 (1992) pp. 747-754.
- [13] D. Mazumdar, R.I.L. Guthrie, *The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems*, The Iron and Steel Institute of Japan international, 35 (1995) 1.
- [14] A.W. Nienow, M.F. Edwards, N. Harnby, *Mixing in the process industries*, Second ed., Butterworth-Heinemann, 1997, pp. 1–24.
- [15] M. Hernández-Hernández, J.L. Camacho-Martínez, C. González-Rivera, M.A. Ramírez-Argáez, *Impeller design assisted by physical modeling and pilot plant trials*, Journal of Materials Processing Technology, 236 (2016).
- [16] M. Hernández-Hernández, W. Cruz-Mendez, C. González-Rivera, M.A. Ramírez-Argáez, *Effect of process variables on kinetics and gas consumption in rotor-degassing assisted by physical and mathematical modeling*, Materials and Manufacturing Processes, 30 (2015) 2.
- [17] M. Lance, J. Bataille, *Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air–water flow*, Journal of Fluid Mechanics, 222 (1991).
- [18] A. Hidalgo-Millán, R. Zenit, C. Palacios, R. Yatomi, H. Horiguchi, P.A. Tanguy, G. Ascanio, *On the hydrodynamic characterization of the straight Maxblend impeller with Newtonian fluids*, Chemical Engineering Research and Design, 90 (2012) 9.
- [19] N.V. Prakash, J. Martínez-Mercado, L. van Wijngaarden, E. Mancilla, Y. Tagawa, D. Lohse, C. Sun, *Energy spectra in turbulent bubbly flows*, Journal of Fluid Mechanics, 791 (2016).