

# Sensor Sumergible Multivariable para la Supervisión y Optimización del Proceso de Flotación

## Multivariable submersible sensor for the supervision and optimization of the flotation process

Miguel Maldonado, Ignacio Ramos, José Martínez, Alfredo Artigas  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Santiago de Chile.  
[miguel.maldonado@usach.cl](mailto:miguel.maldonado@usach.cl)

### Resumen

---

Este artículo describe el desarrollo y validación de un sensor sumergible que proporciona en línea y en tiempo real mediciones asociadas a las propiedades de la dispersión de aire y suspensión de partículas en la zona de colección de máquinas de flotación industriales. La tecnología proporciona en forma simultánea y en tiempo real mediciones de la concentración de aire (*gas holdup*), la densidad, viscosidad y temperatura de la pulpa mineral suspendida bajo la espuma en una máquina de flotación. El sensor comprende una celda de exclusión de gas, un flujómetro másico Coriolis y una unidad de procesamiento de datos. La celda de exclusión de gas es un tubo con ambos extremos abiertos y que tiene una contracción gradual en su área de sección transversal que se asemeja a un cono invertido truncado. El flujómetro másico Coriolis consiste de un tubo único recto de titanio de una pulgada que está conectado mediante *flanges* a la celda de exclusión de gas. Cuando el dispositivo sensor se sumerge verticalmente en la pulpa mineral aireada, se induce un flujo descendente continuo de pulpa sin burbujas a través del dispositivo; en donde la magnitud del flujo inducido es proporcional a la concentración de aire en la región en donde el dispositivo sensor está sumergido. En este artículo se presenta su validación en distintas máquinas de flotación industriales. La tecnología fue desarrollada en el Laboratorio de Flotación de la Universidad de Santiago, protegida por la USACH mediante múltiples patentes nacionales e internacionales y licenciada a la Empresa de base Científico Tecnológica U-Sensing Spa para su transferencia tecnológica.

**Palabras Clave:** Sensor; Multivariable; Optimización; Burbujas; Flotación.

### Abstract

---

This article describes the development and validation of a novel submersible sensor that measures on-line and in real-time variables related to the properties of gas dispersion and particle suspension in the collection zone of industrial flotation machines. The sensing technology provides measurements of the gas holdup and the density, viscosity, and temperature of the slurry under the froth. The device comprises a gas exclusion cell, a Coriolis mass meter, and an electronic processing unit. The gas exclusion cell is a tube that exhibits a gradual contraction in its cross-sectional area that resembles a truncated inverted cone. The Coriolis meter consists of a one-inch Titanium straight tube assembled to the gas exclusion cell by flanges. When the sensor device is vertically immersed in the aerated slurry, a flow of slurry without bubbles is induced through the sensor, whose magnitude is proportional to the concentration of gas in the region where the sensor is immersed. This article presents the sensor validation in different industrial flotation machines. The technology was developed in the Laboratory of Flotation at the University of Santiago, protected under patents, and licensed to the spinoff U-Sensing SpA for facilitating its transfer to the industry.

**Keywords:** Sensor; Multivariable; Optimization; Bubbles; Flotation.

## Introducción

La supervisión, control y optimización del proceso de flotación requiere del desarrollo de nuevos sensores que proporcionen información en tiempo real del estado del proceso. Por ejemplo, los avances en la tecnología de procesamiento de imágenes han permitido que cámaras digitales monitoreen la superficie de la espuma, lo que ha permitido la aplicación de estrategias de control de velocidad de rebose de espuma (Supomo *et al.*, 2008). Desafortunadamente, actualmente no existen sensores que proporcionen información acerca de las condiciones hidrodinámicas en la zona de colección de las máquinas de flotación, esto es, debajo de la espuma. La zona de colección, caracterizada por la interacción de partículas suspendidas en agua y burbujas, comprende el mayor volumen en una máquina de flotación y su rendimiento establece el límite para la máxima recuperación alcanzable. Entre las variables que caracterizan la zona de colección, podemos mencionar aquellas relacionadas a la dispersión del aire, tales como, la velocidad superficial del gas, la concentración de gas, el tamaño de burbujas y el flujo del área superficial de la burbuja. Además, las características relacionadas con la suspensión de partículas son igualmente importantes y entre ellas podemos mencionar la concentración de sólidos, la viscosidad de la pulpa, el tamaño de las partículas, composición mineral, entre otras. En particular, se ha determinado que la concentración volumétrica de gas se correlaciona directamente con el flujo del área interfacial de burbujas (Finch *et al.*, 2000; Lopez-Saucedo *et al.*, 2012), variable ampliamente utilizada para modelar la constante cinética en el proceso de flotación. Además, la teoría del enjambre de burbujas para la modelación de la recuperación por arrastre (*entrainment*) sugiere que el principal mecanismo que explica la presencia de ganga liberada en el concentrado se debe a la pulpa arrastrada mecánicamente hacia la espuma por la acción de enjambres ascendentes de burbujas (Smith y Warren, 1989). Por lo tanto, esto sugiere que la recuperación de partículas finas de ganga en la zona de colección es impulsada por la concentración predominante de gas y partículas debajo de la interface pulpa-espuma. Finch *et al.* (2006), reportó que para una concentración de espumante dada, la concentración de gas se correlaciona linealmente con el agua en el concentrado, una variable comúnmente utilizada para modelar el arrastre (Savassi *et al.*, 1998). Lo anterior sugiere que la disponibilidad de mediciones de dispersión de aire y partículas podría aportar en la supervisión, control y optimización en tiempo real del proceso de flotación. Esto ha im-

pulsado el desarrollo de nuevos sensores en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago (Maldonado y Gómez, 2018; Maldonado *et al.*, 2020).

## Metodología y Análisis

### Sensor sumergible

El prototipo industrial está compuesto por una celda de exclusión de gas de acero inoxidable, la cual corresponde a un tubo de diámetro superior 8" que presenta una contracción gradual hasta 1" en su extremo inferior, tal como se aprecia en la Figura N° 1. Unido al extremo inferior de la celda de exclusión de gas se utiliza un flujometro másico Coriolis de tubo único recto de material de titanio modelo Pro-mass I500 de ENDRESS+HAUSER. La Figura N° 1 muestra una ilustración con las medidas geométricas del dispositivo junto a una foto del prototipo industrial actual.

Al sumergir verticalmente el dispositivo sensor de concentración de gas y sólidos en la zona de colección de una máquina de flotación (bajo la espuma), y debido a la restricción en el área transversal de su sección inferior, el número de burbujas que inicialmente ingresa al dispositivo sensor a través de su extremo inferior será menor al número de burbujas que libremente ascienden en la zona exterior al sensor. De esta forma la densidad aparente de la pulpa al interior del sensor será inicialmente ligeramente mayor que la densidad de la pulpa aireada en el exterior de este lo que inducirá como resultado un flujo descendente de pulpa desde el interior del sensor hacia el exterior de este retornando a la celda de flotación. Este flujo continuo descendente que sale desde el sensor a través de su extremo inferior reducirá aún más el ingreso de burbujas aumentando así la densidad de la pulpa al interior respecto de la pulpa aireada en el exterior lo que nuevamente producirá un flujo descendente de mayor magnitud que terminará por excluir completamente el ingreso de burbujas. Este proceso de exclusión progresiva de burbujas se logra rápidamente estableciendo un flujo continuo descendente de pulpa sin aire cuya magnitud es función de la concentración de aire en la región en donde el sensor está inmerso. La Figura N° 2 muestra una secuencia que ilustra este proceso de exclusión de burbujas y la generación de un flujo de pulpa sin aire a través del sensor. El grosor de las líneas de flujo ilustradas por medio de flechas es proporcional a la magnitud del flujo.

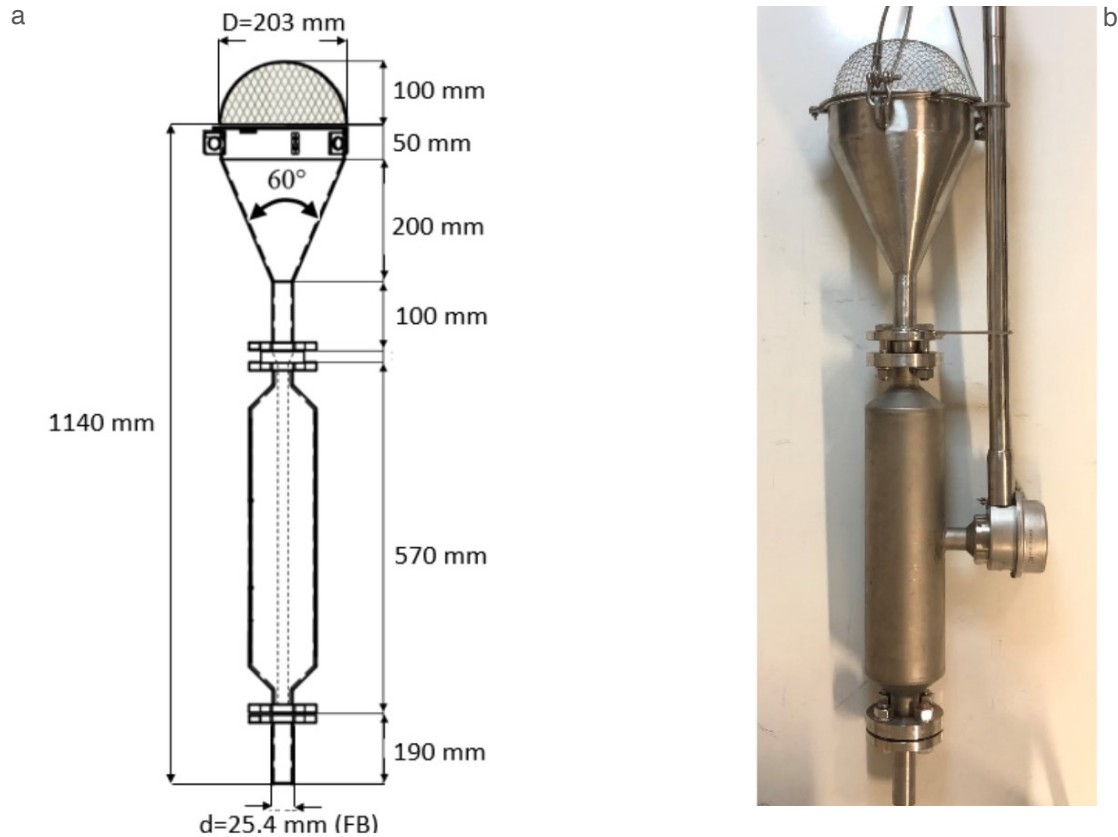


Figura N° 1. Sensor sumergible multivariable (U-Sensing modelo MVS-001) (a) Ilustración con medidas geométricas. (b) Fotografía prototipo industrial.

Una vez que se ha establecido el equilibrio del proceso de exclusión de burbujas, la concentración de aire al exterior del dispositivo sensor sumergido se puede obtener mediante un balance de energía a la pulpa que fluye entre el extremo superior e inferior del sensor. Esto da lugar a las siguientes ecuaciones (Maldonado y Gomez, 2018; Maldonado *et al.*, 2020):

$$\begin{aligned} \epsilon_g &= \left(\frac{100}{2gL}\right) \left(\frac{v_b}{C_d}\right)^2 (1 - \beta^4) \\ \epsilon_s &= 100 \cdot \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_s - \rho_l} \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

- $\epsilon_g$  : Concentración volumétrica de aire. %v/v
- $\epsilon_s$  : Concentración de sólidos. %v/v
- $v_b$  : Velocidad de la pulpa en la sección inferior. m/s
- $\rho_p$  : Densidad de la pulpa mineral proporcionada por el flujometro Coriolis. kg/m<sup>3</sup>
- $L$  : Largo total del dispositivo. M

- $C_d$  : Coeficiente de descarga. Adim
- $B$  : Razón de contracción (diámetro inferior /diámetro superior d/D). Adim
- $\rho_l$  : Densidad del líquido. kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_s$  : Densidad del sólido seco. kg/m<sup>3</sup>

Para la supervisión de plantas, es preferible la medición de la concentración de sólido en peso, la cual puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\% \text{ sólido en peso} = \epsilon_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (3)$$

El coeficiente de descarga se define como la razón entre la velocidad del fluido teórica y la real y captura las pérdidas de energía que sufre el fluido al pasar a través del sensor sumergible además de las desviaciones en el perfil de velocidad asumido ser plano (régimen turbulento). De esta forma el rango del coeficiente de descarga va entre 0 y 1 y es función del número de Reynolds (Miller, 1996). Una curva típica del Coeficiente de Descarga versus Número

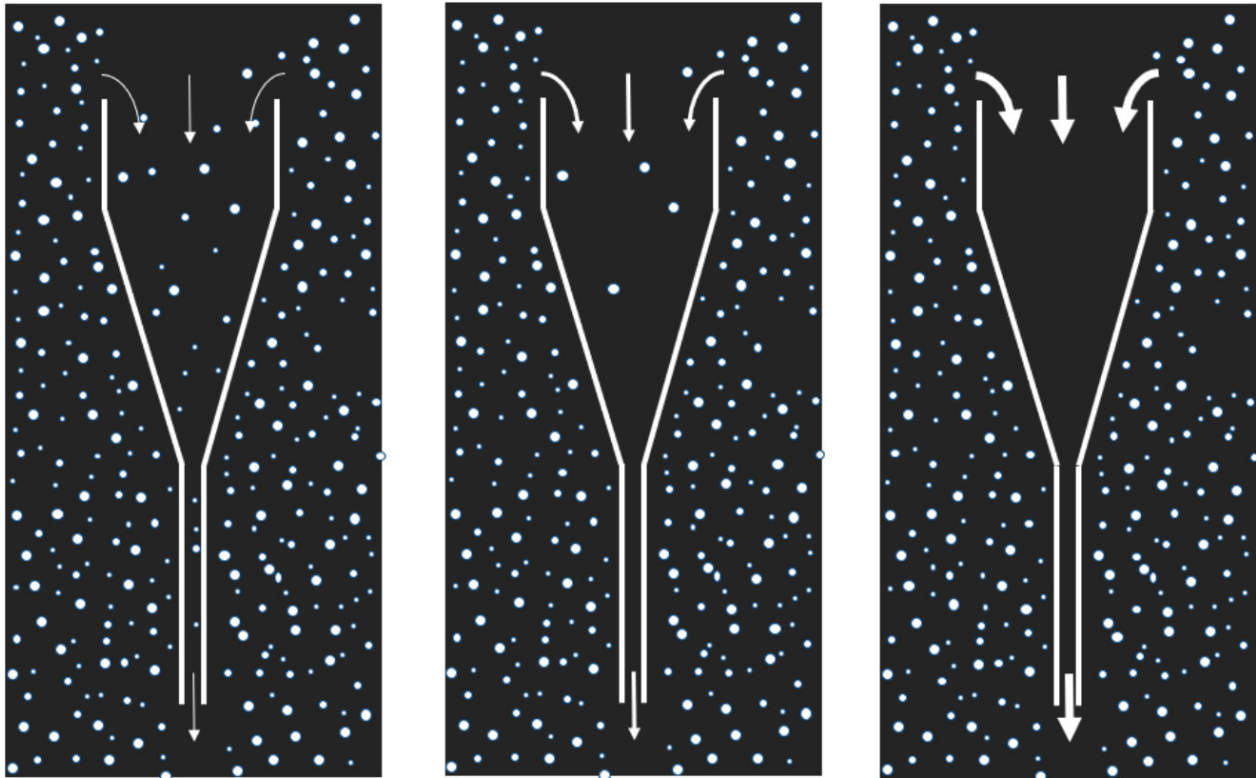


Figura N° 2. Exclusión progresiva de burbujas al interior del dispositivo sensor.

de Reynolds para el sensor sumergible se muestra en la Figura N° 3. Cabe destacar que el número de Reynolds es función de la velocidad, la densidad y viscosidad de la pulpa inducida, variables medidas por el flujómetro Coriolis.

## Evaluación Industrial del sensor multivariable

La tecnología de medición sumergible ha sido evaluada exitosamente en diferentes tipos de celdas de flotación operando bajo diferentes condiciones hidrodinámicas. En particular, el dispositivo se ha evaluado en los siguientes tipos de máquinas de la etapa Rougher:

- Celda auto-aspirante 250m<sup>3</sup> Wemco (Minera Los Pelambres, MLP)
- Celda aire forzado rotor tradicional OK130 m<sup>3</sup> (Codelco División Andina, DAND)
- Celda aire forzado rotor tradicional OK160 m<sup>3</sup> (Codelco División Chuquicamata, DCh)
- Celda aire forzado rotor tipo FloatForce OK300m<sup>3</sup> (Codelco División Ministro Hales, DMH)

Para la comparación de las mediciones realizadas por el sensor, se utilizaron equipos auxiliares que miden las variables en cuestión. La concentración volumétrica de gas (gas holdup) fue medida directamente utilizando el muestreador manual JK Tech Air Holdup Probe, la muestra obtenida por dicho muestreador fue utilizada para medir la densidad de la pulpa dividiendo la masa en su respectivo volumen. Por su parte, la medición de viscosidad fue contras-

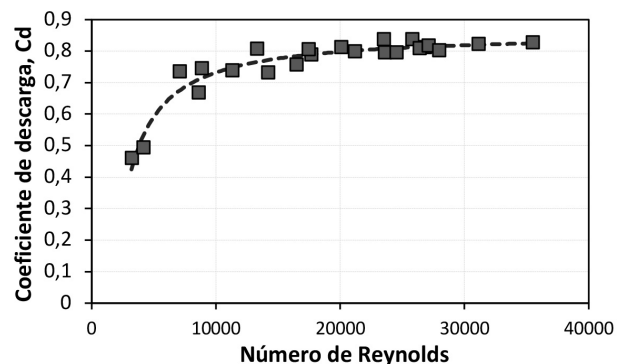


Figura N° 3. Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds

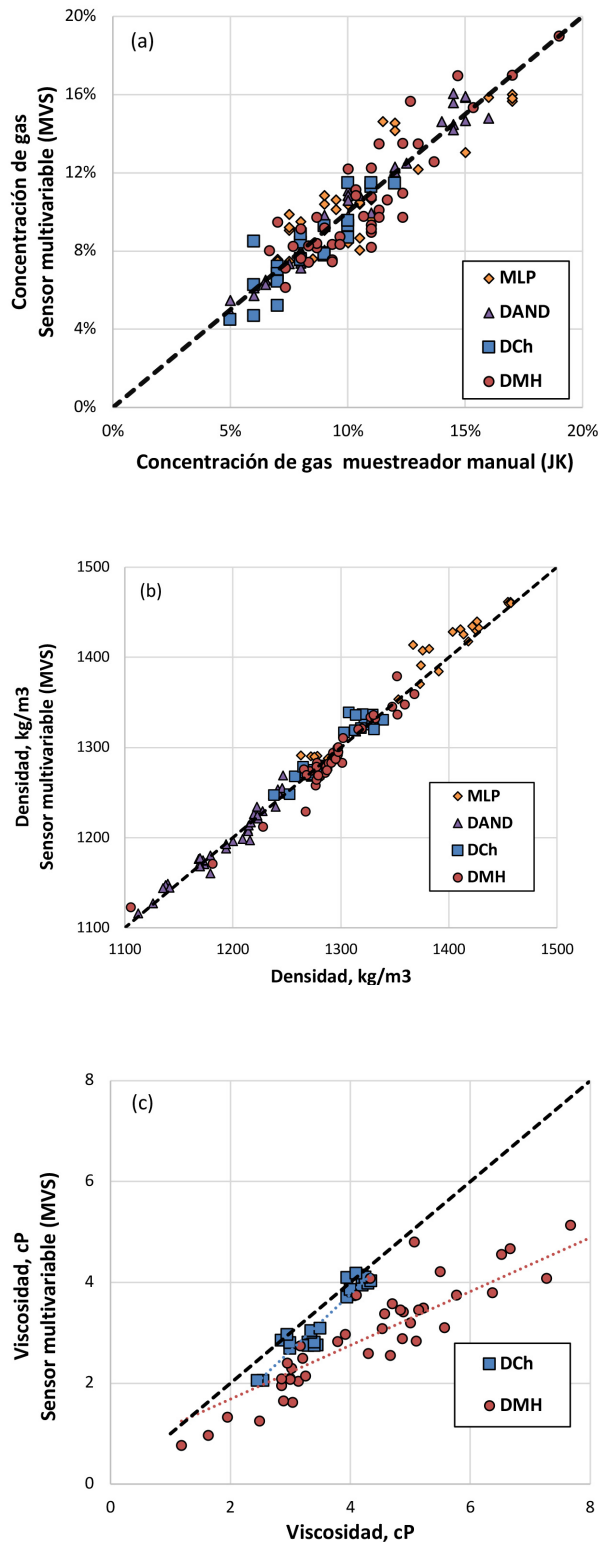


Figura N° 4. Evaluación sensor sumergible. (a) Concentración de aire. (b) Densidad de pulpa. (c) Viscosidad de pulpa.

tada con la medición proporcionada por un viscosímetro vibratorio portátil Hydramotion modelo Viscolite 700.

## Resultados y Discusiones

La Figura N° 4 muestra las mediciones de concentración de gas, densidad de la pulpa y la viscosidad de la pulpa proporcionadas por el sensor sumergible versus las mediciones de las respectivas variables medidas de manera independiente, en distintas operaciones mineras. Se puede observar una excelente correlación para la concentración de aire y densidad de la pulpa. Respecto a la viscosidad se puede observar que existe una alta correlación pero que esta depende de la planta, en este caso División Chuquicamata y Ministro Hales.

La Figura N° 5 muestra la validación realizada en la celda 11 de la línea 2 perteneciente a la división Chuquicamata para la concentración de gas, densidad y viscosidad de pulpa, respectivamente. Validaciones realizadas el día 29 de junio del 2022. Se solicitaron cambios del flujo de aire para 3 instancias sucesivas, en primer lugar, la condición nominal de aire; la cual corresponde a un caudal de aire de 7 m<sup>3</sup>/min, seguido del máximo flujo de aire inyectado, esto es 13 m<sup>3</sup>/min, luego el flujo de aire es disminuido al mínimo llegando a 4 m<sup>3</sup>/min. El sensor multivariable siguió dichos cambios de manera dinámica tal como se aprecia en las figuras siguientes. Es importante destacar que cambios en el flujo de aire no solo modificaron la concentración de aire como era de esperar, sino que también genera un impacto en la suspensión de partículas, observado a través de los cambios en la densidad y viscosidad de la pulpa mineral inducida a través del sensor.

## Conclusion

Se describe una tecnología de medición que consiste de un sensor sumergible que mide simultáneamente y en tiempo real la concentración de gas y sólidos además de la viscosidad de la pulpa. El prototipo sensor consta de una celda de exclusión de gas y un flujómetro másico Coriolis. El sensor se evaluó exitosamente en celdas industriales de tipo autoaspirante y aire forzado de distintas magnitudes, lo que demuestra su potencial para la supervisión y optimización del proceso de flotación.



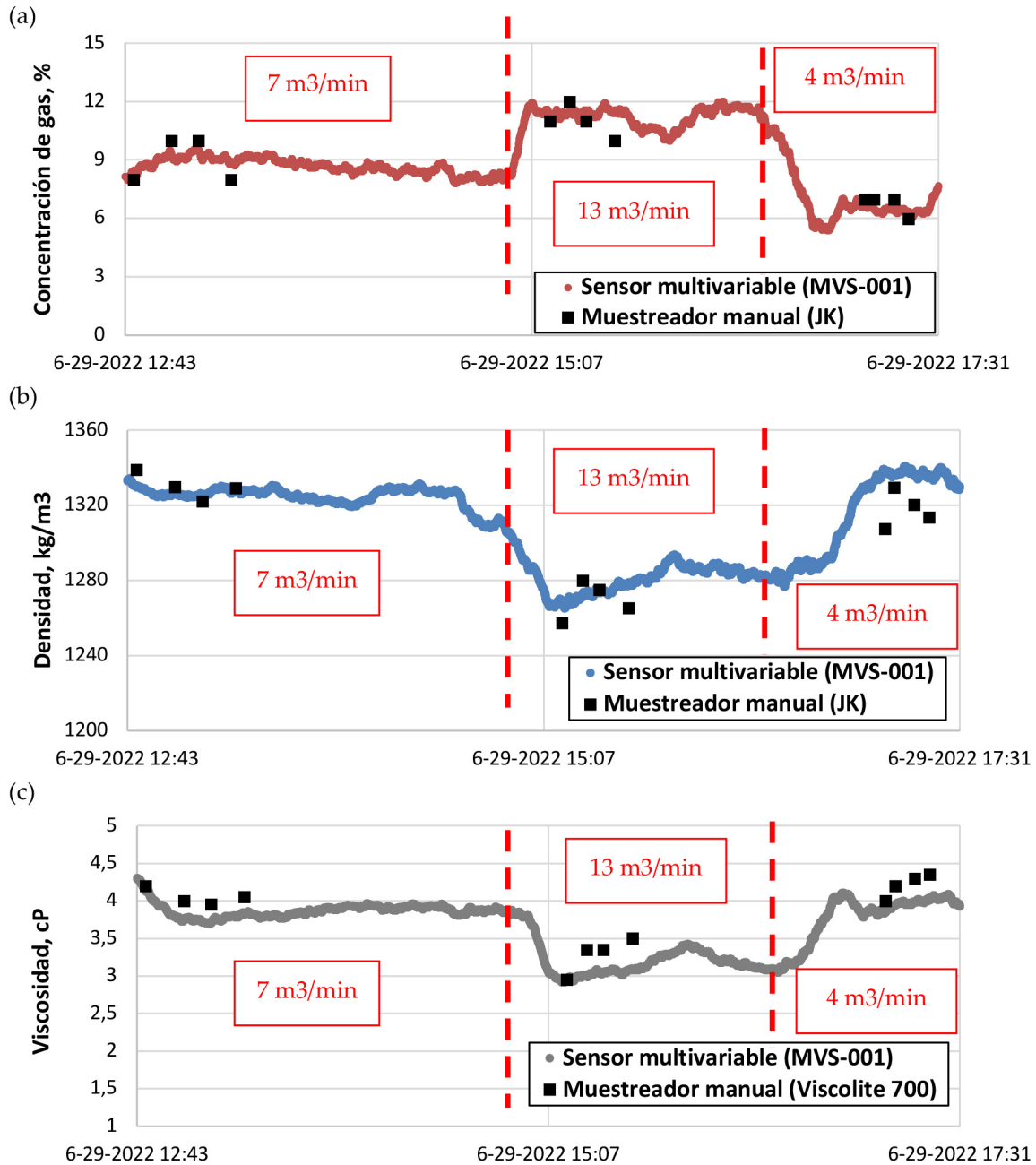


Figura N° 5. Respuesta dinámica en celda aire forzado OK 160 m<sup>3</sup> (DCh) para cambios escalones en el flujo de aire. (a) Concentración volumétrica de gas. (b) Densidad. (c) Viscosidad.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la agencia chilena de Investigación, Desarrollo e Innovación (ANID) a través del proyecto FONDECYT ID 1211705. Un especial agradecimiento va para AMSA MLP y CODELCO por su apoyo en la validación de la tec-

nológica. En particular se agradece el apoyo de Pablo Bustos (ex MLP, actualmente en Codelco DCh) y Nicolás Miranda (ex Codelco DAND, actualmente en Minera Caserones).

## Referencias

---

- Finch JA, Xiao J, Hardie C, Gómez CO. 2000. Gas dispersion properties: Bubble surface area flux and gas holdup. *Minerals Engineering* 13: 365-372. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00019-4)
- Finch JA, Gelinis S, Moyo P. 2006. Frother-related research at McGill University. *Minerals Engineering* 19: 726-733. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.027>
- Lopez-Saucedo F, Uribe-Salas A, Pérez-Garibay R, Magallanes-Hernandez L. 2012. Gas dispersion in column flotation and its effect on recovery and grade. *Canadian Metallurgical Quarterly* 51: 111-117. <https://doi.org/10.1179/1879139511Y.0000000033>
- Maldonado M, Gomez C. 2018. A new approach to measure gas holdup in industrial flotation machines Part I: Demonstration of working principle. *Minerals Engineering* 118: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.001>
- Maldonado M, Cretier R, Melendez M, Gomez CO. 2020. A new approach to measure gas holdup in industrial flotation machines Part II: Effect of fluid properties. *Minerals Engineering* 148: 106177. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106177>
- Miller RW. 1996. *Flow measurement engineering handbook*. McGraw-Hill Education, New York, USA.
- Savassi ON, Alexander DJ, Franzidis JP, Manlapig EV. 1998. An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Miner Eng* 11: 243 -256.
- Smith PG, Warren LJ. 1989. Entrainment of particles into flotation froths. *Miner Proc Extract Metal Rev* 5: 123-145.
- Supomo A, Yap E, Zheng X, Banini G, Mosher J, Partanen A. 2008. PT Freeport Indonesia's mass-pull control strategy for rougher flotation. *Miner Eng* 21: 808-816.