

Capítulo 3 Desarrollo de sistema de control de reactivos con base en la inspección de la superficie de la espuma y su relación con el monitoreo del flujo de ganga en una columna de flotación

Chapter 3 Development of reagent control system based on the inspection on the surface of the froth and its relationship with the monitoring of the tail flow in a flotation column

ESTRADA-RUIZ, Rosa Hilda†*¹, FLORES-CAMPOS, Rubén², VELARDE-SÁNCHEZ, Emma Julia¹ y MARTÍNEZ-CARRILLO, Diego³

¹*Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Saltillo. Departamento de Posgrado e Investigación.*

²*TERMOPLÁSTICOS REMI S.A. de C.V.*

³*Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas de la U.A. de C.*

ID 1^{er} Autor: *Rosa Hilda, Estrada-Ruiz* / **ORC ID:** 0000-0002-1315-0708, **CVU CONACYT ID:** 172600

ID 1^{er} Coautor: *Rubén, Flores-Campos* / **ORC ID:** 0000-0001-7538-1547, **CVU CONACYT ID:** 94697

ID 2^{do} Coautor: *Emma Julia, Velarde-Sánchez*

ID 3^{er} Coautor: *Diego, Martínez-Carrillo* / **ORC ID:** 000-0002-6695-9746, **CVU CONACYT ID:** 43163

DOI: 10.35429/H.2019.2.35.49

R. Estrada, R. Flores, E. Velarde y D. Martinez

rhestrada@itsaltillo.edu.mx

A. Marroquín, J. Olivares, P. Diaz y L. Cruz. (Dir.) La invención y las mujeres en Mexico. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2019.

Resumen

Este artículo presenta la propuesta de dos sistemas de monitoreo que hacen uso de sistemas de visión artificial para detectar si el proceso de flotación de carbón se encuentra operando eficientemente. Estos sistemas inspeccionan la superficie de la espuma y el flujo de colas. Se creó una interfaz gráfica para el monitoreo, así como un sistema de control de adición de reactivos. Cuando se detecta una falla en la operación, la cual se ve reflejada en la velocidad de la espuma o en la tonalidad del flujo de colas, se activa una alarma en el sistema de control para que el operador pueda agregar los reactivos típicos en la flotación, tales como espumante y colector. Estos son variables muy importantes en el proceso y son los más comúnmente utilizados para mejorar la recuperación de mineral valioso. Para llevar a cabo esto, se programó una interfaz en Matlab que fue enlazada al sistema de visión; se programaron las técnicas de análisis y el sistema de control de reactivos. Para esto, se construyó un sistema de control de dosificación de reactivos con una tarjeta Arduino Uno, un circuito de disparo y dos bombas peristálticas. Empleando una columna de flotación de laboratorio completamente instrumentada y con dos sistemas de visión instalados, uno en el flujo de colas y el otro en la parte superior de la columna para adquirir imágenes de la superficie de la espuma, fue posible relacionar la recuperación de sólidos con la velocidad de la espuma y con la tonalidad del flujo de colas. Para obtener diferentes recuperaciones de mineral se varió la altura de la cama de espuma, detectando que cuando hay altas recuperaciones de mineral la espuma es fluida y presenta un promedio de intensidad de píxel de 30 en el flujo de colas, donde 0 es negro y 250 blanco. Por el contrario, cuando hay bajas recuperaciones, se presenta una espuma estática y viscosa, y una tonalidad de 10 muy cercana a negro, lo cual indica que el mineral valioso se pierde en este flujo.

Visión artificial, Monitoreo, Control, Columna de flotación

Abstract

This paper presents the proposal of two monitoring systems that make use of artificial vision systems to detect if the coal flotation process is operating efficiently. These systems inspect the froth surface and the tail flow. A graphical interface for monitoring was created, as well as a reagent addition control system. So when a fault is detected in the operation, which can be reflected in froth velocity or in the tonality of the tail flow, an alarm is activated to the control system so that the operator can add typical reagents in flotation, such as frother or collector, these They are very important variables in the process and are the most commonly used to improve recoveries of valuable ore. To achieve this an interface was programmed in Matlab that was linked to the vision system; the image analysis techniques and the reagent control system were programmed. For this, a dosing control system with an Arduino Uno card, a trigger circuit and two peristaltic pumps was built. Using a fully instrumented laboratory flotation column and with two vision systems installed, one in the tail flow and the other at the top of the column to acquire images of the froth surface, it was possible to relate the solids recovery with the froth velocity and with the tonality in the tail flow. To obtain different mineral recoveries, the froth height bed was varied, detecting that when there are high mineral recoveries the froth is fluid presenting an average pixel intensity of 30 in the tail flow, where 0 is black and 250 white. On the contrary, when there are low recoveries, there is a static and viscous froth, and a tonality of 10 very close to black is present, which indicates that valuable mineral is lost in that flow.

Artificial vision, Monitoring, Control, Flotation column

Introducción

Los objetivos de cualquier empresa de procesamiento de minerales al implementar sistemas de monitoreo y control en los procesos, es el de incrementar su capacidad, mejorar la recuperación de los minerales de interés, mejorar la ley o pureza de los concentrados, reducir los costos de operación mediante la disminución del consumo de reactivos químicos, que el personal sea más productivo, entre otros. En esta industria se trata de procesar los minerales para separar los que son de interés (mineral valioso) del de desperdicio (mineral ganga o colas) y en ella existen diferentes etapas en el proceso de separación que incluye la concentración gravimétrica, flotación, separación magnética, lixiviación, calcinación, entre otros.

Los procesos de flotación son los más ampliamente utilizados en la industria del procesamiento de minerales para realizar una separación selectiva. Aún si este proceso fue desarrollado en los años 60's por Pierre Bountin y Remi Tremblay (1963), se han y siguen desarrollando investigaciones para mejorarlo ya que su naturaleza compleja, que involucra la química de la flotación, las variables operacionales y al equipo en sí hace difícil su control y optimización. De hecho, una pequeña variación en alguno de estos aspectos se propaga a los demás factores que finalmente afectan el producto final, lo cual es difícil de detectar hasta que se realizan muestreos del sistema que pueden evidenciar de forma tardía las fallas en la operación y por tanto tener pérdidas económicas.

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes técnicas para el monitoreo y control automático de las plantas de flotación de minerales, con el afán de mejorar el control y la eficiencia de sus procesos. Una de las técnicas que ha tomado auge en la modernización del proceso ha sido el desarrollo de máquinas de visión artificial para monitorear las superficies de las espumas ya que con su estructura se puede tener un indicativo del grado y recuperación del mineral valioso. Estas máquinas de visión tienen como objetivo estandarizar, de forma cuantitativa, el monitoreo que realizan los operadores para controlar el proceso de flotación. Sin embargo, se sabe que en los procesos de separación de carbón los operadores expertos monitorean los flujos de ganga para detectar si se está perdiendo o no mineral valioso. En este proyecto se propone el monitoreo de este flujo mediante visión artificial y se relaciona con la recuperación de sólidos en el concentrado.

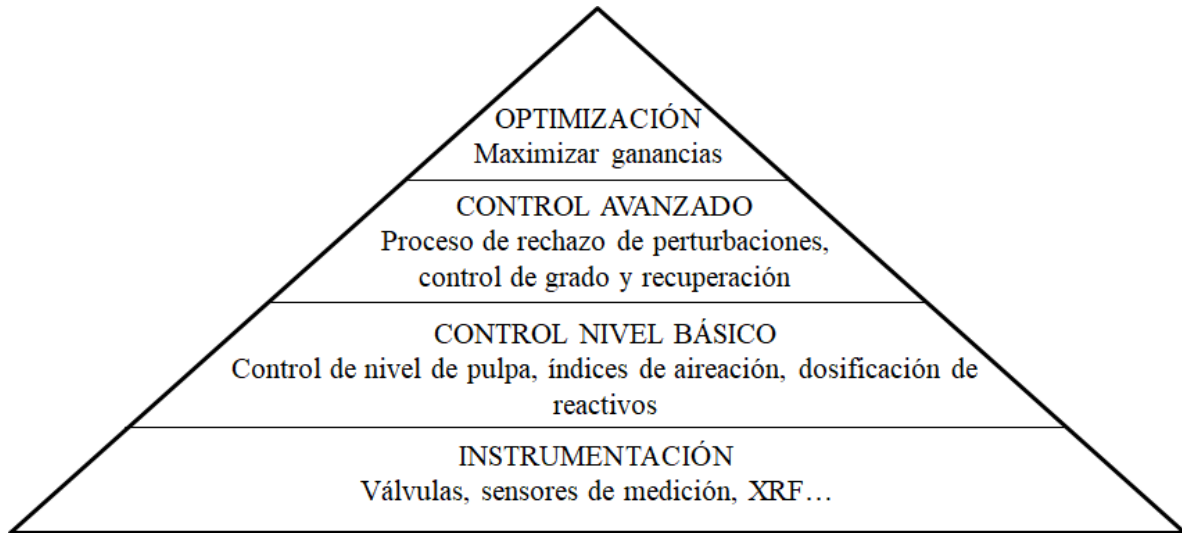
En la práctica, los operadores expertos son capaces de clasificar visualmente las espumas en diferentes categorías, las cuales están asociadas a las condiciones de operación. Se han desarrollado numerosos sistemas de visión desde los años 80's con el afán de monitorear y controlar el proceso de flotación (Aldrich y col., 2010; Holtham y Nguyen, 2002; Jahedsaravani y col., 2014a; Jahedsaravani y col., 2014b; Jahedsaravani y col., 2016b; Kaartinen y col., 2006; Kistner y col., 2013; Marais y Aldrich, 2011; Mehrabi y col., 2014; Moolman y col., 1996a; Moolman y col., 1995a; Moolman y col., 1996b; Peng y col., 2016; Jahedsaravani y col., 2017a).

El objetivo de estas máquinas de visión es detectar características de la superficie de la espuma como la distribución de tamaño de burbuja, color, velocidad y estabilidad de la espuma. Estas características se extraen de las imágenes y se asocian a las variables del proceso, tal como el flujo de aire, dosificación de reactivos, pH, porcentaje de sólidos en la pulpa, etc., las cuales son manipuladas para mantener los parámetros de operación (grado y recuperación) en los niveles deseados (Holtham y Nguyen, 2002; Kaartinen y col., 2006; Supomo y col., 2008; Jahedsaravani y col., 2017b; He, 2018). En lo que respecta al monitoreo del flujo de ganga no se ha reportado en la literatura algún trabajo relacionado.

Se ha estudiado la creación de lazos de control automático que utilicen la información provista por estas máquinas de visión artificial que monitorean la superficie de la espuma. Laurila y col., (2002) describen la jerarquía del proceso de control para los procesos de flotación, Figura 3.1. El nivel básico es el de la instrumentación en sí del sistema, y que es la base de éste en donde el diseño, elección y mantenimiento de los instrumentos es de gran importancia para cualquier sistema de control.

Además, para elegir los instrumentos correctos se debe tener un entendimiento profundo del funcionamiento y aplicación de éstos dentro del sistema. En el control básico es importante mantener las variables primarias, tales como el nivel de la pulpa, flujo de aire y adición de reactivos, en los set points adecuados. Los dos niveles que siguen son parte del control avanzado de la flotación, que involucra la optimización y control del proceso considerando mantener los parámetros de operación tal como el grado (pureza) y recuperación del mineral para maximizar la eficiencia y ganancias económicas.

Figura 3.1 Jerarquía de niveles del proceso de control para procesos de flotación (Laurila y col., 2002)



Fuente: Laurila, H., Karesvuori, J., Tiili, O. (2002). Strategies for instrumentation and control of flotation circuits. Mineral Processing Plant Design, Practise and Control, Volume 1, pp. 2174–2195. ISBN-10: 0873352238

Hasta la fecha se siguen estudiando y proponiendo técnicas de análisis de imágenes que proporcionen estimaciones más cercanas en la determinación de las variables de la superficie de la espuma aprovechando el avance tecnológico computacional para aprovechar la velocidad de procesamiento en los sistemas de cómputo y en los softwares que se encuentran en el mercado o bien diseñar uno propio que pueda incluir el sistema de control de variables.

En este trabajo se propone relacionar una de las variables importantes que caracterizan la espuma de flotación, como lo es la velocidad con la que ésta fluye y el monitoreo del flujo de ganga para asociarlo a la recuperación de mineral en el concentrado, de modo que cuando se detecte una deficiencia en la operación a partir de este monitoreo se solucione esta situación mediante la adición de reactivos. Cabe mencionar que este control de reactivos en base a la inspección visual se realiza en línea mediante una interfaz gráfica y un sistema dosificador de reactivos que es capaz de adicionar la cantidad específica que determine el operador experto.

Contenido

1. Monitoreo mediante sistema de visión artificial de la superficie de la espuma en una columna de flotación
 - 1.1. Estimación de la velocidad de la espuma mediante la técnica de correlación cruzada normalizada
2. Aparato experimental
3. Control de la dosificación de reactivos a partir del monitoreo de la velocidad de la superficie de la espuma
 - 3.1. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma: Medición manual.
 - 3.2. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma automático: Método de correlación cruzada normalizada.
4. Relación de la velocidad de la espuma con la recuperación de sólidos en el concentrado.
5. Efecto de la recuperación de sólidos en el concentrado en el monitoreo de la superficie de la espuma y el flujo de ganga.
6. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma y adición de reactivos: Método automatizado (en línea).
7. Conclusiones
8. Agradecimientos
9. Referencias

1. Monitoreo mediante sistema de visión artificial de la superficie de la espuma en una columna de flotación

Las columnas de flotación son los equipos más importantes y ampliamente utilizados para la separación de los minerales. En su funcionamiento el mineral que es introducido es primeramente reducido a ciertos tamaños de partículas para ser posteriormente combinado con líquido y ciertos reactivos químicos para formar una suspensión que se sujeta a un mezclado que permita que las partículas no se sedimenten y se mezclen homogéneamente. La pulpa mineral que se forma es introducida a contracorriente del aire inyectado a la columna que forma pequeñas burbujas, y las cuales hacen contacto con las partículas. Las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas para formar un agregado burbuja-partícula que asciende hasta la superficie de la columna en donde se forma una cama de espuma. Las partículas que no se adhieren a las burbujas descienden hasta llegar a la salida de colas o ganga. Esta espuma finalmente es quien lleva las partículas de interés a la superficie para finalmente rebosar y ser colectada en otro depósito en donde se recupera el mineral.

Las partículas de interés se hacen hidrofóbicas al adicionar surfactantes que se adsorben en su superficie y la modifican para que puedan adherirse a las burbujas y finalmente puedan ser recuperadas, dejando a las otras partículas, que no son de interés, en una forma hidrofílica para que no se adhieran y se colecten en el flujo de ganga.

Se ha reportado que una de las variables que monitorean los operadores para el control del proceso es el color de la espuma, ya que este se encuentra fuertemente relacionado al tipo de mineral y a su concentración (Hätonen y col., 1999; Bonifazi y col., 1998a; Bonifazi y col., 1999; Moolman y col., 1996; Hargrave y Hall, 1997). Por otra parte se ha mostrado que la movilidad, estabilidad y el tamaño de burbuja son las características más significativas de la espuma, ya que están relacionadas al grado de mineralización de ésta (Moolman y col., 1996, Estrada-Ruiz y Pérez-Garibay, 2009). Investigadores como Cilliers y col., han utilizado estas características para evaluar la eficiencia del proceso y estimar la cantidad de mineral que se recupera. Una de las características más importantes, de las antes mencionadas, es la velocidad de la espuma, ya que este es el indicador más significativo de la cantidad de mineral que se recupera y por consecuencia del estado en el que opera el proceso (Cilliers y col., 1998; Estrada-Ruiz y col., 2012).

1.1. Estimación de la velocidad de la espuma mediante la técnica de correlación cruzada normalizada

Una de las primeras técnicas para la estimación de la velocidad de la espuma fue utilizada por Cilliers y col. (1998) y Asplin y col. (1998), la cual consiste en filmar la superficie de la espuma directamente desde arriba en una celda de flotación de laboratorio, de tal forma que la velocidad de la superficie de la espuma cerca del rebose puede ser determinada mediante el seguimiento del avance de las burbujas individuales en un par de imágenes.

Otra técnica, más robusta que consume menos tiempo de análisis y que permite su aplicación en línea, es la reportada por Holtham y Nguyen (2002). El método está basado en la igualación de objetos, es llamado rastreo de píxel y se fundamenta en dos suposiciones:

- a. El objeto seleccionado no es distorsionado durante la medición. Esto puede considerarse cierto si el intervalo de tiempo entre dos imágenes consecutivas es suficientemente pequeño (Biland (1987); Wiklund y Granlund (1987)).
- b. La intensidad luminosa de cualquier punto del objeto es invariable durante la medición. Esto también puede considerarse verdadero dentro de un intervalo corto de tiempo entre las imágenes.

La descripción matemática de la técnica de la correlación cruzada para encontrar la posición en la cual se encuentra una plantilla $w(x,y)$ dentro de una imagen $f(x,y)$, se inicia planteando la ecuación que calcula la distancia Euclideana cuadrada, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación (Lewis, 2003). Cabe recordar en este punto que $f(x,y)$ es una matriz cuyos elementos tienen un valor proporcional a la intensidad luminosa.

$$d_{f,w}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f(x, y - w(x - u, y - v))]^2 \quad (1.1)$$

donde f es entonces la imagen de mayor tamaño que la plantilla w . El resultado de esta ecuación es la suma del cuadrado de las diferencias de los elementos de la matriz plantilla con diferentes secciones de la imagen f . Es decir, la matriz plantilla w se va restando a diferentes secciones (de igual dimensión de la plantilla) de la imagen f y posteriormente cada diferencia se eleva al cuadrado. En la expansión de d^2

$$d_{f,w}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f^2(x, y - 2f(x, y)w(x - u, y - v) + w^2(x - u, y - v))] \quad (1.2)$$

El término $\sum w^2(x - u, y - v)$ representa la intensidad luminosa de la plantilla y es constante y el término $\sum f^2(x, y)$, que representa la intensidad luminosa en cada sección de la imagen f , es aproximadamente constante, entonces lo que permanece en la función de correlación cruzada es

$$c(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)w(x - u, y - v) \quad (1.3)$$

Esta es la medición de la similitud entre la imagen y la plantilla.

Existen varias desventajas en el uso de la Ecuación 1.3 para encontrar la posición de igualación de la plantilla:

- Si el brillo de la imagen $\sum f^2(x, y)$ varía con la posición, la igualación con la Ecuación (1.6) puede fallar.
- El rango o valores de $c(u, v)$ depende del tamaño de la plantilla.
- El resultado de la Ecuación 1.3 puede modificarse debido a los cambios en la amplitud de intensidad de la imagen, tal como aquellos causados por el cambio de iluminación a través de la secuencia de imágenes.

El coeficiente de correlación supera estas dificultades mediante la normalización de los vectores de la imagen y la plantilla a una longitud de 1, arrojando un coeficiente de correlación que se determina por la siguiente ecuación:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \overline{f_{u,v}}][w(x - u, y - v) - \overline{w}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \overline{f_{u,v}}]^2 \sum_{x,y} [w(x - u, y - v) - \overline{w}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1.4)$$

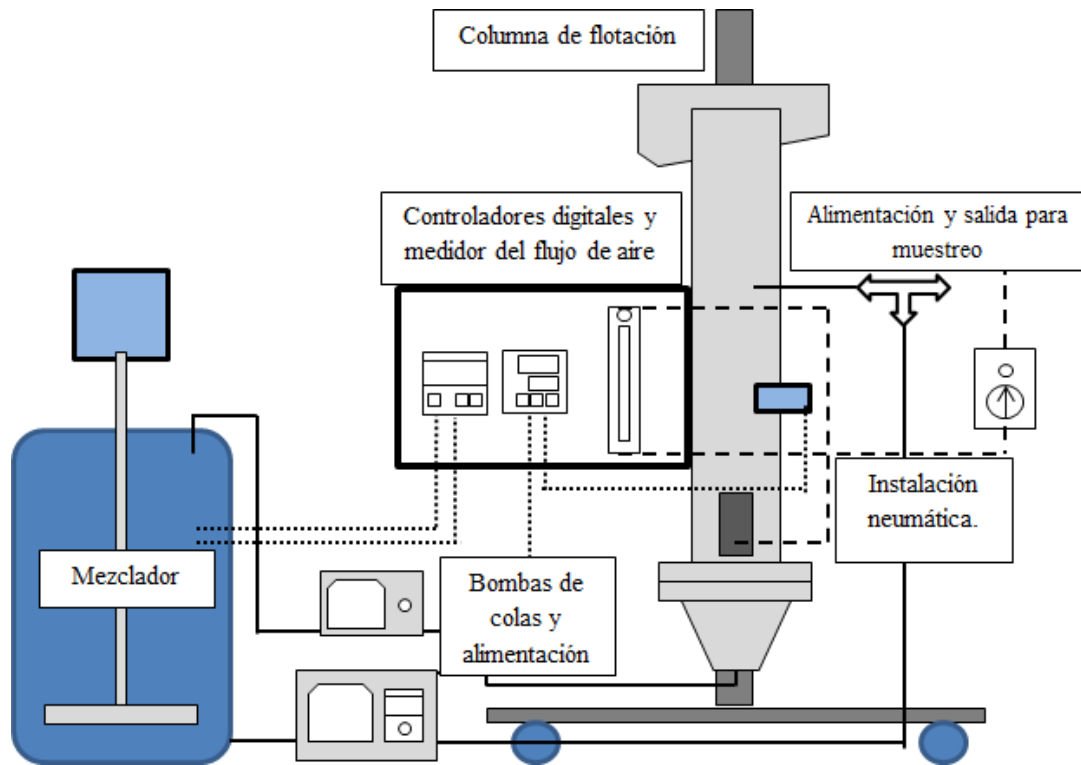
Donde \overline{w} es la intensidad luminosa media de la plantilla y $\overline{f_{u,v}}$ es la intensidad media de $f(x, y)$ en la región bajo la plantilla. La Ecuación 3.6 se presenta como la correlación cruzada normalizada (Lewis, 2003).

Cabe recordar que el grado de similitud entre las imágenes será representado por el valor del pico de correlación, en donde los valores cercanos a 1 muestran que las imágenes presentan grandes similitudes entre ellas, valores de correlación cercanos a 0 indican que las imágenes tienen grandes diferencias entre ellas y valores de -1 determinan correlaciones inversas.

2. Aparato experimental

La etapa experimental se realizó de manera similar con lo reportado por Estrada-Ruiz y col., 2012, pero con la diferencia del acondicionamiento del mineral. Los experimentos se realizaron en una columna de flotación de laboratorio de 180 cm de alto y 9.5 cm de diámetro. Para lograr generar diferentes características en la superficie de la espuma se manipuló su profundidad y la adición de colector en cada una de las pruebas. La Figura 3.2 muestra la instrumentación de la columna.

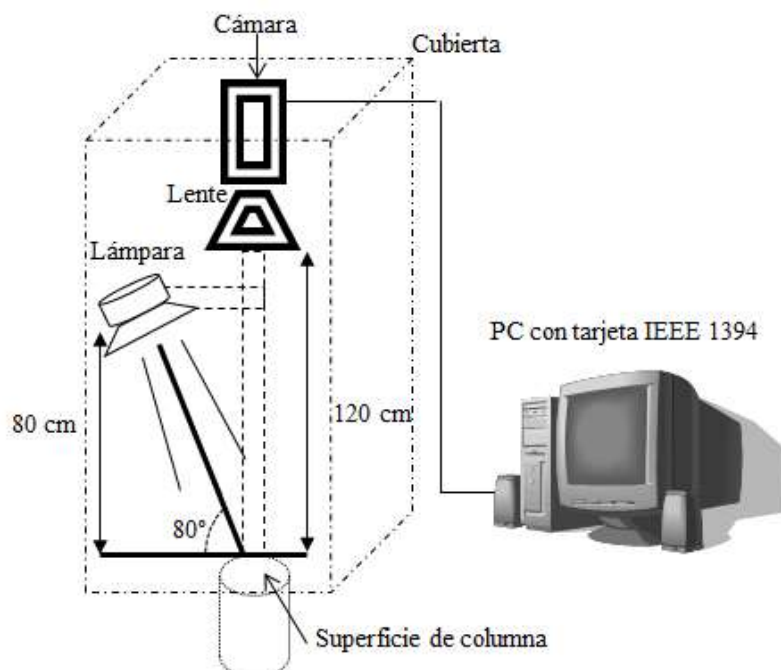
Figura 3.2 Aparato experimental



Fuente: Estrada Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R., Martínez-Carrillo, D., Flores-Campos, R., Morales-Morales, J.A. 2012. Visión artificial para el monitoreo y control de reactivos en línea en una columna de flotación de laboratorio. Congreso Nacional de Control Automático. 107-112.

Para la adquisición de las imágenes de la superficie se instaló una videocámara conectada a una PC a 120 cm sobre la cima de la columna, y complementariamente se instaló una cubierta como cámara de aislamiento de luz externa y una lámpara de halógeno de 90 W, que fue colocada a 80 cm por encima del labio de rebose, manteniendo un ángulo de 80° con respecto a la superficie de la espuma, Figura 3.3.

Figura 3.3 Sistema de adquisición de imágenes de la superficie de la espuma



Fuente: Estrada Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R., Martínez-Carrillo, D., Flores-Campos, R., Morales-Morales, J.A. 2012. Visión artificial para el monitoreo y control de reactivos en línea en una columna de flotación de laboratorio. Congreso Nacional de Control Automático. 107-112.

El acondicionamiento del mineral fue realizado en un tanque mezclador en el cual se adicionaron 85 L de agua, manteniendo su temperatura en 30°C. Una vez alcanzada la temperatura se agregó el carbón mineral, 9.7 %w con tamaño promedio a 100 µm, conservando la agitación constante, posteriormente se añadió 4.6 kg/ton de colector (Diesel) y espumante (MIBC) con 20 ppm transcurriendo 15 minutos entre cada adición de estos reactivos. Para lograr condiciones estables, la pulpa fue mezclada por un periodo de 15 minutos y después se inició el llenado de la columna de flotación, en donde todos los flujos se establecieron en los valores deseados. Para asegurar el estado estable de operación (circuito cerrado), la columna de flotación fue operada por alrededor de 25 min antes de muestrear la alimentación, concentrado y colas, para asegurarse de la estabilidad del proceso y dar por iniciado el experimento. Una vez iniciado el experimento, para evitar cualquier perturbación del proceso, la alimentación fue muestreada al final de cada prueba debido a que la bomba de la alimentación fue incluida en el lazo de control del nivel de la espuma. De no haber procedido de esta forma, el nivel de caudal de alimentación se incrementaría significativamente como consecuencia del incremento del espesor de la cama de espuma, cuando se toma la muestra del caudal de colas. En este caso el lazo de control fue conformado por un transductor de presión, el cual fue conectado a un controlador que envía la señal eléctrica a la bomba de alimentación para regular el nivel de la espuma a la profundidad deseada.

Las características de la superficie de la espuma fueron modificadas cambiando el espesor de cama de espuma. El nivel de cama de espuma se modificó en cinco ocasiones, para después mantenerse constante durante el periodo de tiempo que se consideraba necesario en cada experimento, de tal forma que se permitiera la toma las imágenes de las burbujas en la superficie de la espuma y en el flujo de colas.

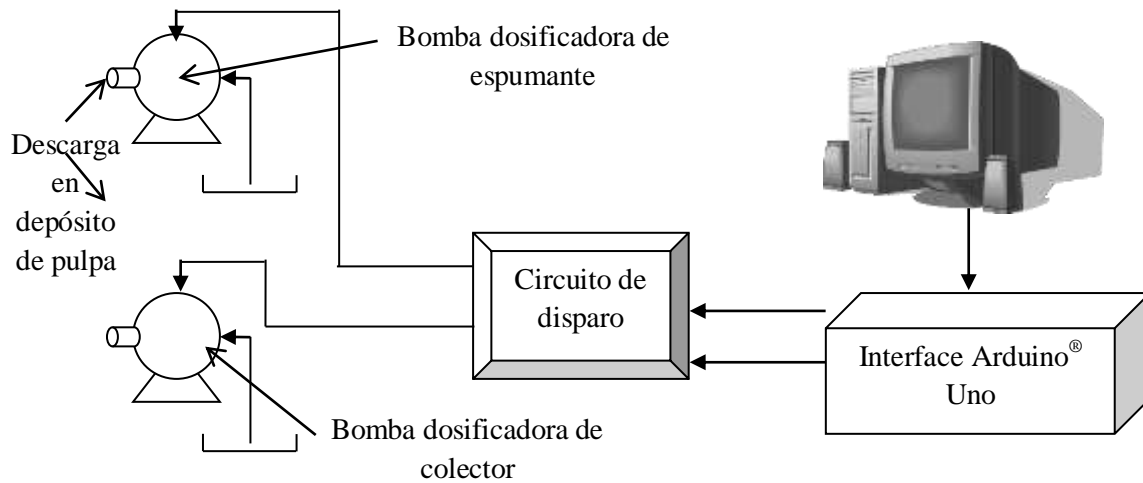
3. Control de la dosificación de reactivos a partir del monitoreo de la velocidad de la superficie de la espuma

Se sabe que la adición de reactivos es la variable más empleada para realizar cambios sustanciales en la recuperación de sólidos en las columnas de flotación. Los reactivos comúnmente utilizados en este proceso son los espumantes y los colectores. Los espumantes se emplean para aumentar el flujo de área superficial para la carga de partículas en el reactor y los colectores son empleado para modificar la superficie de las partículas para hacerlas más hidrofóbicas, esto es, más afines al aire, de tal modo que tengan más probabilidad de adherirse a las burbujas e incrementar su carga.

Existe una variedad de equipo para la adición de reactivos que se utilizan en la industria, y esto es debido a la cantidad que se agregan y la gran variedad de diversidad de reactivos diferentes que existen y que tienen cada uno de ellos sus propiedades químicas y atributos en la flotación. Laurila y col., (2002) reportan que hay dos métodos que se consideran comunes para esta adición: Un dosificador simple on-off que abre una válvula periódicamente y que permite la entrada del reactivo al proceso. En éste se requiere una verificación regular para que se asegure que la cantidad correcta se adicione, y este método puede ser muy inexacto. El otro método implica el uso de bombas de medición, especialmente si los volúmenes que se van agregar son muy pequeños o el costo es importante. Este método es más preciso pero requiere de una inversión costosa por las bombas y requieren de un mantenimiento periódico.

Para realizar la dosificación de reactivos en este trabajo, se diseñó un sistema como el presentado en la Figura 3.4 y el cual consta de un sistema programado en Matlab, una tarjeta Arduino Uno, un circuito eléctrico y un par de bombas de descarga de reactivos químicos.

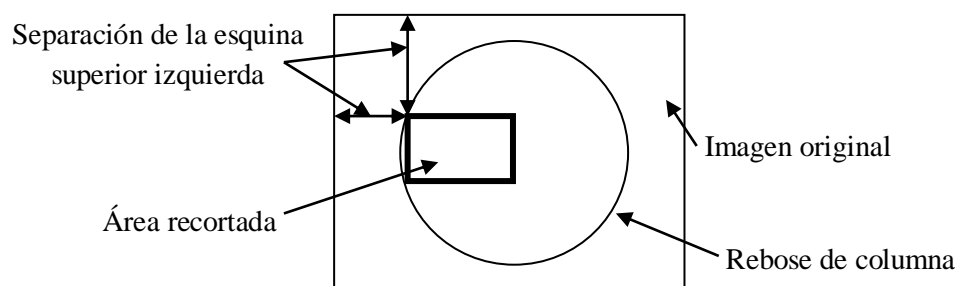
Este sistema de dosificación se encuentra regido por una serie de reglas heurísticas Si – Entonces en donde se hace una comparación de la velocidad estimada y una de referencia. Cuando se encuentra debajo de la medición de referencia se activa una pantalla en donde se tiene la opción de elegir la cantidad de reactivos químicos basados en la calibración de los flujos de las bombas. De tal modo que es posible dosificar diferentes mililitros de colector y espumante de acuerdo con el tiempo de la señal de salida del circuito de disparo.

Figura 3.4 Sistema de dosificación de reactivos

Fuente: Estrada Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R., Martínez-Carrillo, D., Flores-Campos, R., Morales-Morales, J.A. 2012. Visión artificial para el monitoreo y control de reactivos en línea en una columna de flotación de laboratorio. Congreso Nacional de Coontrol Automático. 107-112.

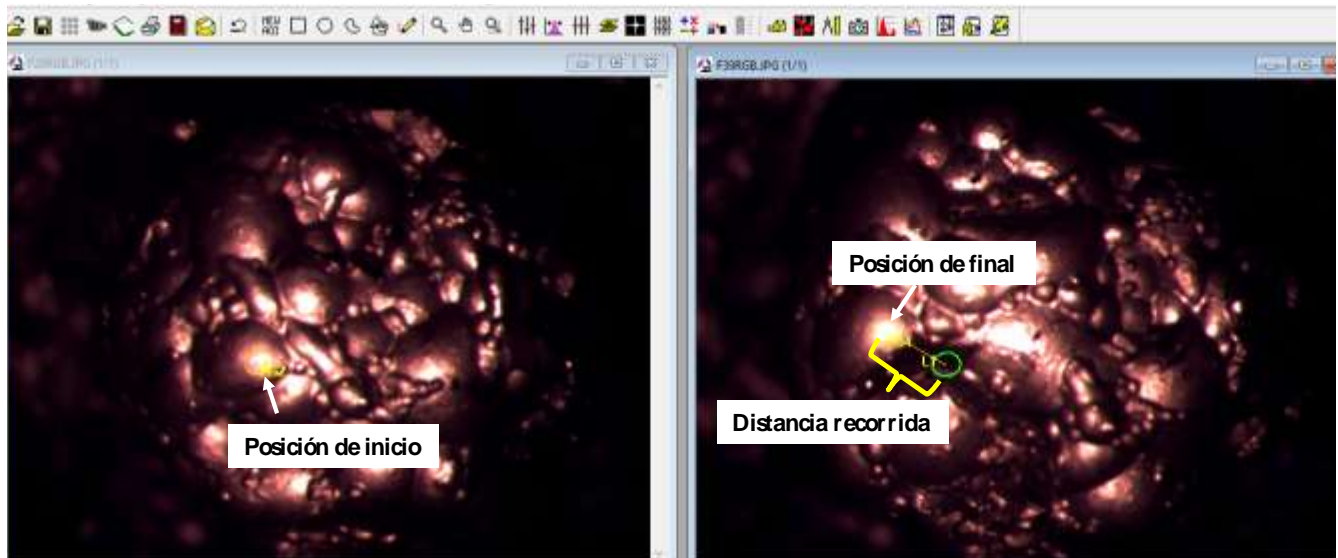
3.1. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma: Medición manual

La medición manual requirió identificar un área de interés en las imágenes, la cual se considera en forma similar en la medición automática, como se indica en la Figura 3.5. Dicha área fue recortada de las imágenes capturadas con la finalidad de hacer más fácil la identificación del recorrido de las burbujas, el recorte se hizo en base a las dimensiones de la imagen original ubicándolo a 180x 140 píxeles (horizontal x vertical) a una distancia de 150 x 190 píxeles desde la esquina superior izquierda de la imagen capturada haciendo uso del software Matlab.

Figura 3.5 Representación del área de interés para el análisis de la superficie de la espuma

Una vez que se identificó el área de interés se procedió a seleccionar las secuencias de imágenes a analizar considerando el desplazamiento de una burbuja a través de la superficie de la espuma hasta que rebosara y se colectara en el concentrado. Para ello se seleccionó una burbuja a seguir en la secuencia, se delimitó la cresta de ésta en la imagen inicial y en la imagen final. La medición de la distancia recorrida se trazó dibujando una línea que marcara los centros de ambas crestas para poder obtener una distancia recorrida a través de las imágenes creando un macro en el software Image Pro-Plus, dicha medición se puede observar en la Figura 3.6, y se dividió entre el tiempo que transcurrió la secuencia de fotografías.

Figura 3.6 Ejemplo de medición manual de la distancia recorrida por una burbuja

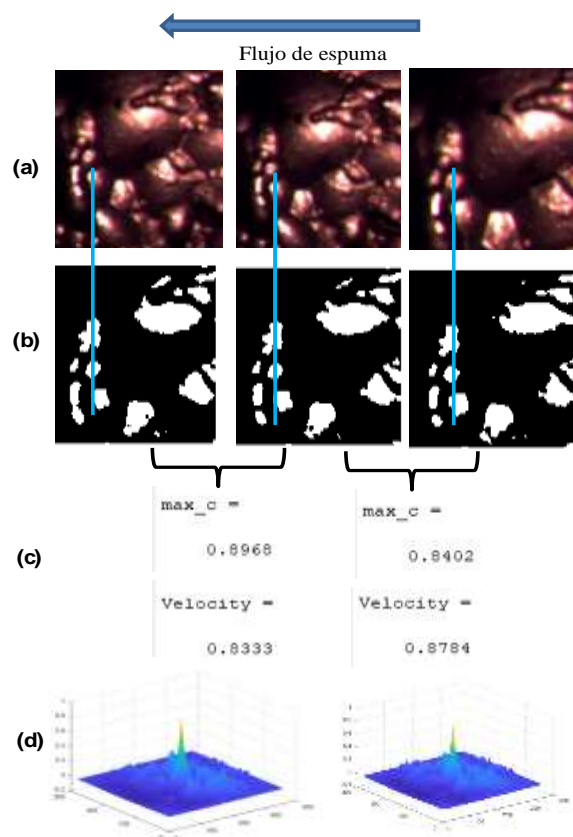


3.2. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma automático: Método de correlación cruzada normalizada

El procedimiento para la estimación de la velocidad utilizando la técnica de correlación cruzada se basa en lo realizado por Estrada-Ruiz y col., 2012, y que consiste en cortar las secciones de la imagen a analizar (Figura 3.7(a)), digitalizarlas y normalizarlas a valores de 0 y 1, como se ilustra en la imagen en formato blanco y negro (sección (b)).

Habiendo normalizado las imágenes se aplica la técnica de correlación cruzada para el análisis de pares de imágenes, la cual proporciona el nivel de correlación (\max_c) y la velocidad calculada por el programa (sección (c)). Los resultados de esta técnica se reportan en gráficos tridimensionales, donde el eje de las ordenadas representa el factor de correlación, correspondiendo el mayor valor al pico de correlación (d). Las coordenadas donde hay más correlación son utilizadas para estimar la distancia recorrida de las intensidades de la primera imagen a la segunda.

Figura 3.7 Estimación de la velocidad de la espuma de manera automática empleando la técnica de correlación cruzada normalizada

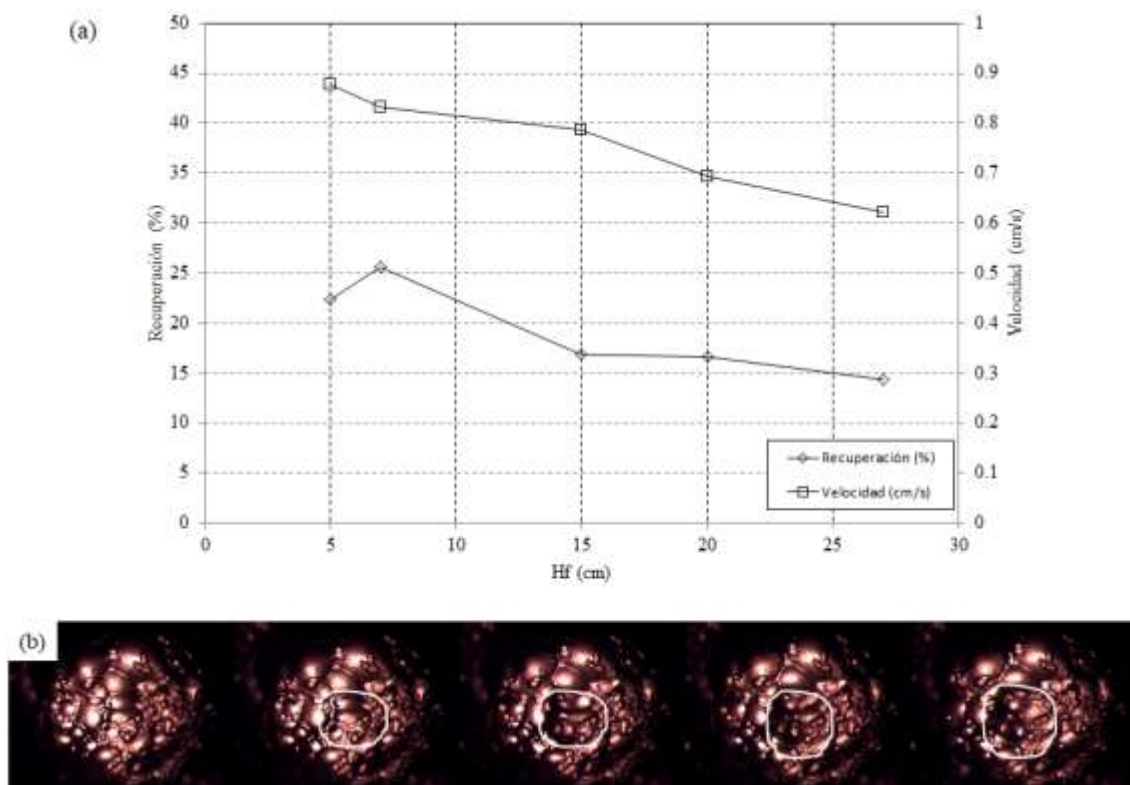


4. Relación de la velocidad de la espuma con la recuperación de sólidos en el concentrado

Como se observa en la Figura 3.8, cuando se presentan velocidades bajas de la superficie de la espuma se tiene baja recuperación de sólidos. Esto probablemente se debe a que cuando entran burbujas con poca carga a la zona de espuma se presenta un alto grado de coalescencia entre ellas, provocando que solo un reducido número de burbujas cargadas avancen con baja velocidad en dirección hacia la salida de concentrado. Se pudo observar que la espuma a una altura de 27 cm al tener un mayor tiempo de residencia la espuma se volvía estática y por tanto las burbujas en la superficie explotaban o calecían, teniendo como consecuencia el colapso en ciertos momentos de la espuma y por tanto el regreso de las partículas a la zona de colección y/o al flujo de ganga.

De acuerdo con Moolman y col., 1996 las espumas pueden ser caracterizadas como líquidas, ideales y viscosas, siendo asociadas directamente con la recuperación de sólidos en el concentrado. En la Figura se presenta esta relación en referencia a las velocidades de espuma correspondientes a las diferentes alturas de cama de espuma. Además, se presenta también las recuperaciones de sólidos para cada espesor, en donde se puede apreciar que la espuma ideal (alta recuperación de sólidos) se encuentra en una altura de cama de espuma de 7 cm correspondiente a una velocidad de 0.83 cm/s. Las recuperaciones de sólidos son baja debido a que el mineral que fue donado por la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila era concentrado de una flotación previa en la Industria, por ello, las velocidades eran lentas y las recuperaciones bajas.

Figura 3.8 Relación entre el espesor de la cama de espuma, recuperación y velocidad con la que fluye (a) y superficie de cama de espuma de 27 cm estática y con colapso de burbujas



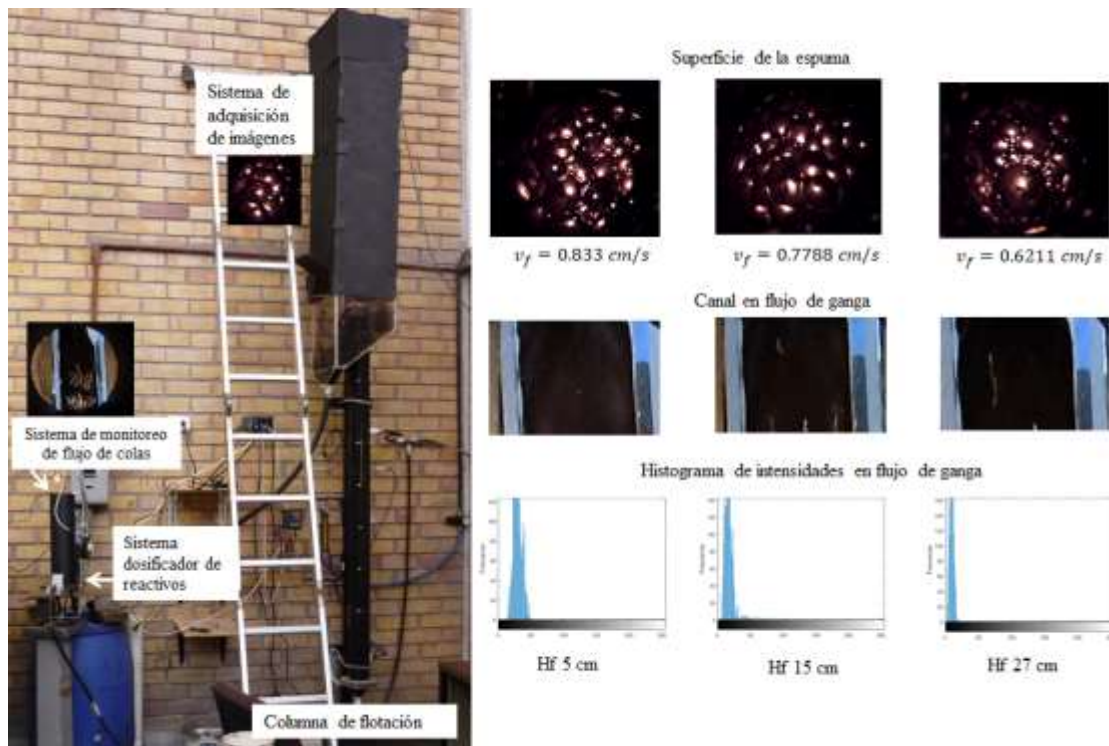
Cuando se presenta el fenómeno de cama de espuma estática, coalescencia y colapso de burbujas se identifica de manera automática en el programa ya que está asociado a la velocidad de la espuma, Figura 3.8(b). Esta velocidad al ser menor que el set point establecido ($v_f=0.85$ cm/s) activa la alarma para la dosificación de reactivos. La decisión de adición de espumante o colector se toma bajo la experiencia del operador.

5. Efecto de la recuperación de sólidos en el concentrado en el monitoreo de la superficie de la espuma y el flujo de ganga

En la práctica, los operadores expertos monitorean de manera frecuente el flujo de ganga en lugar de la superficie de la espuma. En este trabajo se adquirieron imágenes de este flujo, se eligió la sección a analizar y se obtuvieron los histogramas de intensidades de píxel.

En la Figura 3.9 se muestra el sistema experimental integrado especificando el sistema de adquisición de imágenes de la superficie de la espuma y en el flujo de ganga y el sistema dosificador de reactivos. Además, se presentan imágenes representativas de para las alturas de cama de espuma de 5, 15 y 27 cm, en donde se puede apreciar que las intensidades de píxel varían con respecto a cada condición y por tanto a cada recuperación de sólidos. Los valores de intensidad de píxel promedio en escala de grises para estas son 29.38, 17.88 y 9.7 respectivamente, en donde el 0 indica color negro y 255 blanco.

Figura 3.9 Sistema experimental especificando el monitoreo de la superficie de la espuma y flujo de ganga para tres espesores de cama de espuma. Se especifica el histograma de intensidades en el flujo de ganga bajo estas condiciones



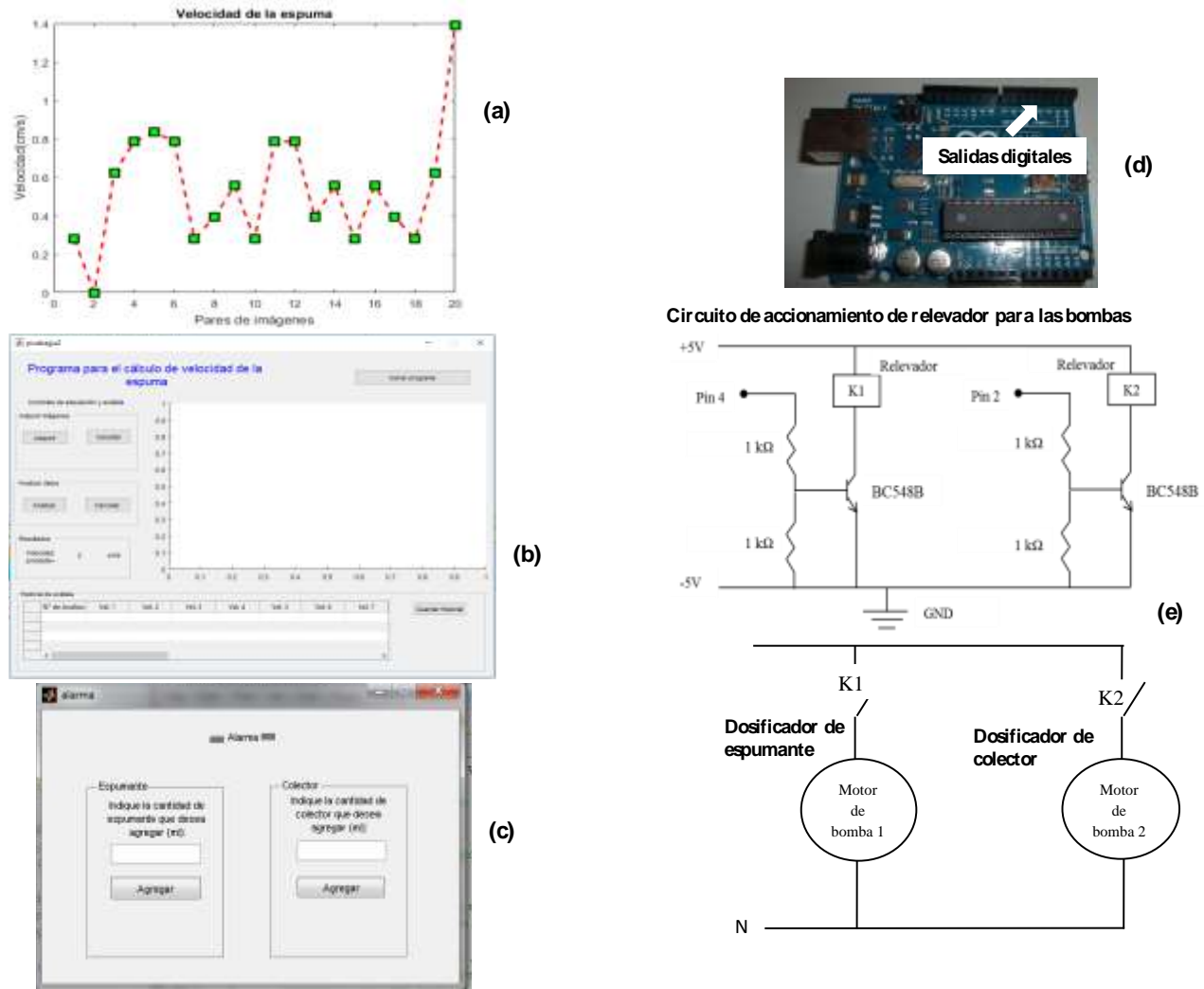
6. Estimación de la velocidad de las burbujas en la superficie de la espuma y adición de reactivos: Método automatizado (en línea)

El sistema de dosificación de reactivos se basa en la velocidad con la que fluye la espuma, para ello se realizaron pruebas preliminares en Matlab, ver Figura 3.10 (a). Una vez validada la programación preliminar se procedió a realizar una interfaz gráfica en tiempo real (Figura 3.10 (b)). El sistema de dosificación hace uso de dos bombas peristálticas de caudal constante las cuales son accionadas por el circuito de control. Este circuito fue construido de tal manera que permitiera el enlace entre la interfaz Arduino Uno y las bombas (Figura 3.10 (d y e)). Para ello fue necesario la implementación de un programa de enlace entre Matlab con la tarjeta Arduino Uno, para permitir la activación de las salidas digitales indicadas fue necesario la instalación de la tarjeta en la PC para que se reconociera como un puerto serie adicional. Esta detección permitió la comunicación con el software de la tarjeta y para enlazarla con Matlab fue necesario cargar el programa “adiosrv.pde” en la memoria del microprocesador para después ejecutar el archivo “install_arduino.m” desde Matlab, el cual habilitó la comunicación directa con la tarjeta. Una vez lograda la comunicación con la tarjeta, se implementó un circuito de disparo que acciona las bombas dosificadoras, como se muestra en el circuito de potencia. El circuito permitió recibir la señal de activación proveniente de dos de las salidas digitales de la tarjeta y así accionar a los relevadores encargados de encender y apagar las bombas.

Con la interfaz gráfica es posible iniciar la adquisición de imágenes para que estas sean procesadas y así estimar en línea la velocidad con la que fluye la espuma grificándola en tiempo real. En el programa se establece un valor de velocidad óptima (set point), que puede ser establecida según el criterio de los operadores. Cuando el valor estimado sobre pasa el set point se lanza una alarma (Figura 3.10 (c)) para que el operador pueda agregar espumante o colector, según lo que crea conveniente. Cabe mencionar que esto lo puede realizar desde la sala de control, de modo que no tenga que desplazarse hasta el sitio donde se encuentran las columnas de flotación.

Para la adición de reactivos se consideró conveniente establecerlo en mL ya que las bombas fueron calibradas para que proporcionaran un caudal constante, por lo que la variable que se consideró estimar por el programa fue el tiempo de accionamiento del relevador cuando en la pantalla se le introduce el valor de mL que se desea agregar al sistema.

Figura 3.10 Interfaz gráfica de monitoreo de velocidad de la espuma con señal de alarma, circuito de disparo y circuito de accionamiento de bombas dosificadoras de reactivos



7. Conclusiones

El monitoreo de los procesos de flotación de minerales es de gran importancia para asegurar el buen funcionamiento, la eficiencia y evitar pérdidas financieras. En los procesos de flotación de carbón mineral se inspecciona la superficie de la espuma, pero con más frecuencia e importancia, se inspecciona el flujo de ganga que indica si se está perdiendo mineral valioso en la columna.

En este trabajo de investigación fue posible asociar la recuperación de sólidos con la velocidad de la espuma al concentrado y las imágenes en el flujo de desperdicio, en donde se concluye que es posible monitorear el proceso de manera automatizada mediante máquinas de visión artificial y detectar bajas recuperaciones de mineral valioso con la propuesta de la adición de reactivos, ya sea espumante o colector, especificando la cantidad por parte del operador experto mediante una interfaz gráfica.

Si bien el monitoreo del flujo de ganga en este trabajo es difícil debido a que las intensidades promedio para cada condición presentan pocas diferencias, ya que el mineral empleado en las pruebas ya había sido flotado con anterioridad, la propuesta de este trabajo es muy factible de aplicar en la flotación de mineral proveniente directo de la mena ya que es muy posible que las diferencias de intensidad de pixel sean más pronunciadas puesto que las impurezas en este mineral son caliza, cuarzo, compuestos de sulfuro, tal como la pirita, cuyas tonalidades contrastan con las del carbón mineral.

El sistema de control de reactivos mediante bombas peristálticas e interfaz gráfica en tiempo real puede ser llevado a cabo mediante el uso de visión artificial en el flujo de ganga de manera estandarizada al establecer un set point de intensidad de píxel provisto por un operador experto y lanzar alarmas de adición de reactivos desde la sala de control de la planta.

Como trabajo a futuro se contempla el implementar la filosofía del Internet de las Cosas (IoT) en este proceso de flotación bajo el esquema de Industria 4.0, de tal modo que se contribuya a las tendencias actuales de la industria en México.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT (México) y al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento recibido para concluir este trabajo, así como a la Escuela Superior de Ingeniería de la U.A. de C. por la donación del mineral.

9. Referencias

- Aldrich, C., Marais, C., Shean, B., Cilliers, J. (2010). Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: a review. *Int. J. Miner. Process.* 96, 1–13.
- Asplin, R. A., Sadr-Kazemi, N., Cilliers, J. J. (1998). The effect of surfactant concentration on batch flotation mineral flux and froth structure. *Minerals Engineering*. Vol. 11, No 3, pp. 257-269.
- Biland, H. P. (1987). Multiple-motion recognition with general Hough transformation. *Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition II*, pp. 251-258.
- Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. (1998). Flotation froth characterization by closed domain (bubbles) color analysis. In: 4th Int. Conf, on quality control by artificial vision, November 10-12, Takamatsu, Japan, pp. 131-137.
- Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. (1999b). Characterization of flotation froth color and structure by machine vision. In *GEOVISION 99*, may 6-7, Liege, Belgium.
- Boutin, P., Tremblay, R.J. 1963. Froth flotation method with counter-current separation. U.S. Patent 3,339,730.
- Cilliers J. J., Asplin R. A., Woodburn E. T. (1998). Kinetic flotation modeling using froth imaging data. Chapter 10. *Frothing in flotation II*. Gordon and Breach Science Publishers, pp.336.
- Estrada-Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R. (2009). Neural networks to estimate bubble diameter and bubble size distribution of flotation froth surfaces. *The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 109, 441-446.
- Estrada Ruiz, R.H., Pérez-Garibay, R., Martínez-Carrillo, D., Flores-Campos, R., Morales-Morales, J.A. (2012). Visión artificial para el monitoreo y control de reactivos en línea en una columna de flotación de laboratorio. *Congreso Nacional de Cocontrol Automático*. 107-112.
- Hätönen J., Hyötiniemi H. Y., Miettunen J., Carlsson L. E. (1999). Using image information and partial least squares method to estimate mineral concentrations in mineral flotation. *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on intelligent processing and manufacturing of material*, July 10-15. Vol. 1, pp. 459-464.
- He. M. (2018). Optimal control of sulphur flotation process base on machine visión. *IFAC Papers online*. 51-21, 169-174.
- Holtham, P., Nguyen, K. (2002). On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JK FrothCam. *Int. J. Miner. Process.* 64, 163–180.

- Jahedsaravani, A., Marhaban, M., Massinaei, M., Saripan, M., Mehrshad, N., Noor, S. (2014b). Development of a new algorithm for segmentation of flotation froth images. *Miner. Metall. Process. J.* 31, 66–72.
- Jahedsaravani, A., Marhaban, M., Massinaei, M., Saripan, M., Noor, S. (2016a). Froth-based modeling and control of a batch flotation process. *Int. J. Miner. Process.* 146, 90–96.
- Jahedsaravani, A., Massinaei, M., Marhaban, M. (2016b). Application of image processing and adaptive neuro-fuzzy inference system for estimation of the metallurgical parameters of a flotation process. *Chem. Eng. Commun.* 203, 1395–1402.
- Jahedsaravani, A., Marhaban, M.H., Massinaei, M. (2014). Prediction of the metallurgical performances of a batch flotation system by image analysis and neural networks. *Miner. Eng.* 69, 137–145.
- Jahedsaravani, A., Massinaei, M., Marhaban, M.H. (2017a). Development of a machine vision system for real-time monitoring and control of batch flotation process. *Int. J. Miner. Process.* 167, 16–26.
- Jahedsaravani, A., Massinaei, M., Marhaban, M.H. (2017b). An image segmentation algorithm for measurement of flotation froth bubble size distributions. *Meas.* 111, 29–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.023>
- Kaartinen, J., Hätönen, J., Hyötyniemi, H., Miettunen, J. (2006). Machine-vision-based control of zinc flotation—a case study. *Control. Eng. Pract.* 14, 1455–1466.
- Kistner, M., Jemwa, G.T., Aldrich, C. (2013). Monitoring of mineral processing systems by using textural image analysis. *Miner. Eng.* 52, 169–177.
- Laurila, H., Karesvuori, J., Tiili, O. (2002). Strategies for instrumentation and control of flotation circuits. *Mineral Processing Plant Design, Practise and Control, Volume 1*, pp. 2174–2195. ISBN-10: 0873352238.
- Lewis, J. P. (2003). Fast normalized cross-correlation. Available from: www.idiom.com/~zilla/index.html#Publications.
- Mehrabi, A., Mehrshad, N., Massinaei, M. (2014). Machine vision based monitoring of an industrial flotation cell in an iron flotation plant. *Int. J. Miner. Process.* 133, 60–66.
- Moolman, D., Aldrich, C., Van Deventer, J. (1995a). The monitoring of froth surfaces on industrial flotation plants using connectionist image processing techniques. *Miner. Eng.* 8, 23–30.
- Moolman, D., Aldrich, C., Van Deventer, J., Bradshaw, D. (1995b). The interpretation of flotation froth surfaces by using digital image analysis and neural networks. *Chem. Eng. Sci.* 50, 3501–3513.
- Moolman, D., Aldrich, C., Schmitz, G., Van Deventer, J. (1996a). The interrelationship between surface froth characteristics and industrial flotation performance. *Miner. Eng.* 9, 837–854.
- Moolman, D., Eksteen, J., Aldrich, C., Van Deventer, J. (1996b). The significance of flotation froth appearance for machine vision control. *Int. J. Miner. Process.* 48, 135–158.
- 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.
- Wiklund, J., Granlund, G. (1987). Tracking of multiple moving objects. *Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition II*, pp. 127–135.