

Controlador predictivo híbrido de un separador gravitacional de fases líquidas con extracción intermitente de productos

Schaaf, M. *

Departamento de Física, Universidad de Atacama, Copayapu 485, Copiapó, Chile.

To cite this article: Schaaf, M., 2020. Hybrid model predictive control of a gravity separator with intermittent product extraction. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17, 318-328. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.11957>

Resumen

La principal tecnología de fusión-conversión de concentrados de cobre empleada en Chile es el Convertidor Teniente. Este proceso presenta una compleja dinámica debido a que combina el ingreso continuo de flujos con la extracción intermitente de los productos en régimen autógeno de operación. Esta investigación presenta una planta a escala que tiene por objetivo medir el comportamiento fluido dinámico de las fases líquidas para predecir el desempeño que podrían tener los sensores de nivel. En la planta a escala se utilizan líquidos inmiscibles a temperatura ambiente e inyección de aire a través de toberas sumergidas para generar emulsión. Fue necesario desarrollar un sensor de niveles basado en visión digital para la planta a escala. La incorporación de un sensor de niveles en línea, permite la implementación de la técnica de control predictivo basada en modelo para optimizar el proceso de separación gravitacional. En esta investigación se evalúa el desempeño de un controlador predictivo, basado en modelo híbrido, en el cual se emplean variables de tipo continuo y discreto. El control predictivo se ha probado en lazo cerrado y su desempeño muestra buenos resultados al considerar las perturbaciones asociada la fase.

Palabras clave: Control predictivo basado en modelo, modelado de sistemas de eventos discretos e híbridos; visión por computador

Hybrid model predictive control of a gravity separator with intermittent product extraction

Abstract

The main fusion-conversion technology of copper concentrates used in Chile is the Teniente Converter. This process presents a complex dynamic due to the fact that it combines the continuous inflow of flows with the intermittent extraction of the products in autogenous operation regime. This research presents a scale plant that aims to measure the dynamic fluid behavior of the liquid phases to predict the performance that the level sensors could have. In the scale plant, immiscible liquids are used at room temperature and injection of air through submerged nozzles to generate emulsion. A digital vision system is used as a level sensor in the scale plant. The online measurement of the levels allowed us to implement a model-based predictive controller to optimize the liquid phase separation process. The prediction model used continuous and discrete variables. The tests of the scale plant using the closed loop predictive control showed good results when considering the perturbations associated with the emulsion phase.

Keywords: Process control, multivariable control, hybrid predictive control, mixed continuous-batch processes, image processing

*Autor para correspondencia: max.schaaf@uda.cl

1. Introducción

La principal tecnología de fundición primaria de cobre empleada en Chile es el Convertidor Teniente (CT). El CT realiza en una sola operación la fusión y la conversión del concentrado de cobre. El CT produce dos productos: metal blanco (75 % Cu) y escoria (8 % Cu) los cuales son separados gravitacionalmente (Mackey P.J. y Campos R., 2001). El metal blanco y la escoria son extraídos intermitente del CT por medio de compuertas ubicadas a alturas diferentes para facilitar la extracción selectiva. La extracción intermitente de los productos del CT introduce características semi-continuas en su dinámica que hacen necesario recurrir a técnicas especiales para describir los diferentes aspectos de la operación del CT.

Desarrollos previos con la técnica de control predictivo tradicional han mostrado buenos resultados disminuyendo la variabilidad de las variables controladas. Debido a que el modelo del controlador predictivo es obtenido a partir de pruebas dinámicas sobre la planta, estos modelos tienen una validez limitada si consideramos que las características del concentrado de cobre cambian en el tiempo. Además la compleja fluidodinámica de las fases líquidas en el interior del convertidor también afecta a los modelos obtenidos.

El desarrollo de un sensor en línea para medir los niveles de las fases líquidas, posibilita la incorporación de estas variables al sistema de control. Sin embargo, la extracción de líquidos a alta temperatura a través de las compuertas se representa por estados binarios (abierta/cerrada). Los modelos que combinan variables continuas con variables discretas son denominados modelos híbridos. En la última década, el estudio de los sistemas híbridos ha despertado gran interés entre los investigadores del área de control y computación. Este tipo de sistemas dinámicos incluyen variables de estado continuas y discretas simultáneamente y acopladas, tanto en tiempo continuo como discreto (Morari M. y Baric M., 2006). La técnica de control predictivo de sistemas híbridos abre la posibilidad de controlar procesos industriales que combinan procesos continuos y por lotes (Sarabia et al., 2007).

Con el objetivo de desarrollar una metodología para planificar y optimizar la operación de las Fundiciones que cuentan con la tecnología Teniente, esta investigación propone la implementación del controlador predictivo híbrido sobre una planta a escala. El artículo describe en la introducción el proceso de fusión y conversión primaria, junto al estado del arte sobre el Convertidor Teniente. En la sección 2 se describe la planta piloto, considerando el montaje experimental y el sistema de visión digital empleado para medir los niveles de fases líquidas. La sección 3 describe un modelo del proceso de separación gravitacional. A partir del modelo obtenido se diseña un controlador predictivo. La sección 4 detalla todos los elementos del controlador y presenta dos pruebas en lazo cerrado. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones de esta investigación.

1.1. Proceso

El convertidor Teniente procesa el concentrado de cobre proveniente del horno de secado con una humedad aproximada del 0.2 %. El concentrado de cobre es inyectado mediante un actuador neumático al interior del convertidor. También es inyectado aire enriquecido con oxígeno (34 %) para facilitar el proceso de conversión. La Figura 1 muestra un esquema

del Convertidor Teniente. Existen tres vías de alimentación del CT: Toberas, Garr-Gun y boca. El concentrado seco es inyectado por medio de 4 toberas, mientras que el aire enriquecido con oxígeno se inyecta a través de 43 toberas a una presión de aproximadamente 2 atmósferas. En las toberas de inyección se produce la acumulación de material, la cual, reduce el flujo de aire que es inyectado. Dos máquinas denominadas MAPUCO son las encargadas de limpiar las toberas.

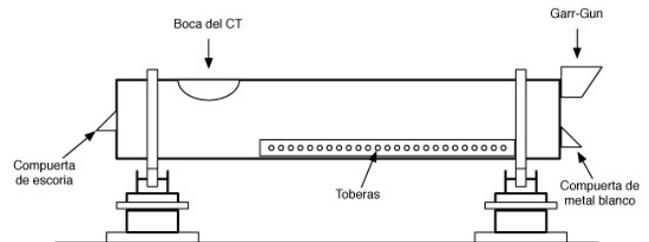


Figura 1: Esquema del Convertidor Teniente.

El proceso de fusión conversión es un proceso autógeno, debido a que el calor generado por las reacciones químicas exotérmicas es aprovechado para fundir el concentrado. Para ajustar el balance térmico se adiciona circulante (o material reciclado frío) por la entrada denominada Garr-Gun ubicada en la parte superior del convertidor. Un flujo de aire se emplea en la entrada Garr-Gun para distribuir estos flujos en el convertidor. También se ingresa fundente silíceo a través del Garr-Gun. El proceso de conversión produce magnetita (Fe_3O_4), la cual, tiene un punto de fusión superior a la temperatura de operación del convertidor. La presencia de magnetita aumenta la viscosidad de la escoria. El exceso de magnetita dificulta la extracción de la escoria a través de su compuerta. Para solucionar este inconveniente, se introduce fundente silíceo que promueve la formación de escoria fayalítica ($FeOSiO_2$) y reduce la magnetita en la escoria.

Como resultado de las reacciones químicas se produce la separación de dos fases al interior del convertidor: Metal blanco y escoria. El metal blanco constituido principalmente por Cu_2S y FeS presenta una densidad mayor que la escoria, por lo cual, este se deposita en la parte inferior del convertidor. El metal blanco y la escoria son extraídos en forma intermitente del CT. La extracción se realiza por compuertas ubicadas en extremos opuestos del convertidor y situadas a alturas diferentes para ayudar a la extracción selectiva de los productos. El metal blanco producido en el CT, que contiene en promedio 75 % Cu, 3 % Fe y 21 % S, se extrae a una temperatura de 1.220 °C. Se realizan extracciones de manera intermitente de metal blanco a través del pasaje (o canal) de sangría, el cual, es refrigerado por agua. Luego el metal blanco se transporta en ollas mediante puentes grúa a los convertidores Peirce-Smith donde continúa el proceso. La Figura 2 muestra el esquema general de operación de una fundición con Convertidor Teniente, donde se destacan las extracciones intermitentes con interruptores.

Por otra parte, la escoria está formada por óxidos, fayalita, magnetita, sílice libre y componentes de la ganga. La extracción de escoria se realiza a una temperatura de 1240 °C y en forma intermitente del CT. La escoria se extrae por canales refrigerados por agua para fluir directamente o ser transportada por ollas hacia los hornos de limpieza de escoria (HLE), donde se proce-

sa para recuperar el cobre atrapado. Parte del cobre es retenido en la escoria por dos mecanismos: retención físico-química y retención mecánica. En promedio la escoria contiene un 8 % de cobre.

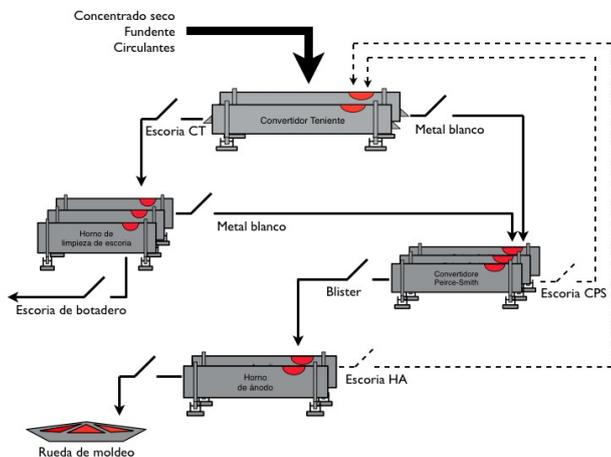


Figura 2: Esquema de una fundición basada en tecnología Teniente, con ingreso continuo de materiales al CT y las extracciones discontinuas de subproductos, que alimentan los procesos Batch siguientes.

Los gases del proceso que contienen principalmente anhídrido sulfuroso, son extraídos en forma continua a través de la boca del CT a una temperatura promedio de 1260 °C. Estos gases junto con el polvo arrastrado son colectados por medio de una campana refrigerada por agua y son enviados a través del circuito de tratamiento de gases hasta la planta de ácidos.

La escoria proveniente de procesos sucesivos se introduce por la boca del Convertidor Teniente. En situaciones especiales, el CT se bascula para extraer escoria a través de su boca.

1.2. Estado del arte

Una completa descripción del proceso de fundición de cobre donde se detallan las tecnologías empleadas a nivel mundial se presenta en (Mackey P.J. y Campos R., 2001). Su artículo referencia las tecnologías empleadas en la evolución del proceso de fundición. Una visión de la producción nacional y las tecnologías empleadas en la actualidad se presenta en (Valenzuela A. et al., 2003). Los artículos (Campos R. y Torres L., 1993; Alvarado R. y Godoy J., 1999) describen detalladamente la operación del CT y la evolución que ha experimentado en el tiempo.

La dinámica de los fluidos en el interior del CT fue investigada por San Martín J. et al. (2003) y Valencia A. et al. (2006). Estas investigaciones realizan un análisis fluido-dinámico y una visión tridimensional de un modelo del CT. Estos desarrollos muestran zonas que presentan diferentes grados de agitación de las fases líquidas.

Diferentes desarrollos abordan la medición de los niveles de fases líquidas en el interior de hornos y convertidores pirometalúrgicos. La primera patente presentada por Paredes L. y Zolezzi A. (2003) utiliza perturbaciones mecánicas para estimar en línea los niveles. Otro importante producto tecnológico desarrollado por el ex Instituto de Innovación Minero Metalúrgico

(IM2), permite medir en línea los niveles de las fases al interior del Convertidor Teniente. El sensor está basado en mediciones electro-resistivas de un conjunto de electrodos montados en la culata de escoria del reactor. Este sistema se probó en Septiembre del 2006 en el Convertidor Teniente 1 de la Fundición de Caletones (Barriga J. et al., 2007). Un método alternativo para medir los niveles de fases líquidas basado en antenas fue presentado en la patente de Sadri A. et al. (2010).

Un trabajo muy interesante destinado a mejorar las características de un modelo pirometalúrgico, utiliza un estimador en línea para predecir la concentración de cobre en el metal blanco y presenta dos estrategias de estimación: una basada en parámetros fijos y otra que emplea parámetros adaptables (Cain S. et al., 1996). En esta última técnica los autores emplean el balance de masa en combinación con el algoritmo de mínimos cuadrados recursivo con factor de olvido exponencial (RLSE), como mecanismo de adaptación para mejorar las predicciones del modelo (Graham C. et al., 1984). El factor de olvido exponencial da mayor importancia a los errores (entre mediciones y predicciones) recientes en el algoritmo adaptativo.

En el año 2006, la empresa Invensys implementó un controlador predictivo en la fundición de Caletones con el objetivo de disminuir las variaciones de la temperatura, de la concentración de cobre en el metal blanco y de la concentración de magnetita en la escoria. Este trabajo se centró en la dinámica continua de la operación (Minergia, 2005). La misma tecnología fue aplicada en el Convertidor Teniente N°2 de la fundición Codelco Norte, mostrando exitosos resultados tales como: una reducción de un 27 % en la variabilidad de la temperatura, una reducción del 31 % en la variabilidad de la concentración de cobre en el metal blanco y una reducción del 13 % en la variabilidad de la magnetita presente en la escoria (Gajardo M., 2008).

En la última década, el estudio de los sistemas híbridos ha permitido representar complejas dinámicas que involucran la transición entre estados de operación. La representación matemática de los sistemas híbridos ha permitido el desarrollo de controladores predictivos para este tipo de sistemas. Hace unos años, Bemporad A. y Morari M. (1999) propusieron la utilización de técnicas de modelado en programación con variables enteras mixtas, para abordar el problema de obtener modelos de sistemas híbridos aptos para tareas de control. Sus modelos son llamados Sistemas Dinámicos y Lógicos Mixtos (Mixed Logical Dynamical Systems, MLD).

Una de las técnicas de modelado más utilizada es la llamada Sistemas Lineales definidos a tramos (Piecewise Linear Systems - PWA). Esta técnica ha sido utilizada durante largo tiempo en el análisis de sistemas no lineales y fue introducida explícitamente en el área de control automático por Sontag E.D. (1981), principalmente para tareas de análisis. El capítulo 10 del libro de Camacho E. y Bordons C. (2004), está completamente dedicado al control predictivo de sistemas híbridos, el cual, entrega ambas perspectivas del control predictivo sobre modelos MLD y PWA. También muestra ejemplos de cada uno de los casos.

Considerando esta nueva perspectiva, Schaaf et al. (2010) desarrollaron un control predictivo híbrido para el proceso del Convertidor Teniente que incorporaba los niveles de fases líquidas como variables controladas. Como innovación se utilizó variables manipuladas continuas para regular el ingreso de ma-

teriales y variables manipuladas discretas para determinar la duración de las extracciones de productos. El diseño del controlador utilizaba la disponibilidad de los procesos aguas abajo como restricciones al problema de optimización. El modelo de predicción fue utilizado para estimar los niveles de fases líquidas en tiempo real. El controlador predictivo fue utilizado como herramienta de apoyo a la producción, donde el cálculo de las variables manipuladas futuras, se presentaban como una sugerencia al operador. La lenta evolución de las tecnologías empleadas en la medición en línea de las fases líquidas, ha retrasado la implementación de este controlador en la industria.

Un paso intermedio, antes de implementar las nuevas tecnologías de control predictivo de sistemas híbrido en la industria, consiste en la implementación y evaluación del desempeño en una planta piloto como el trabajo de De Prada, C. et al. (2009). Además, la fluidodinámica de operación del Convertidor Teniente también ha sido abordada con modelos a escala. En especial, el trabajo experimental de Almaraz A. et al. (2013) muestra el efecto de la agitación en la separación de fases cuando se utiliza inyección con tobera sumergida. El trabajo de Valencia et al. (2013) aborda la disminución de la agitación al interior del Convertidor Teniente empleando, por una parte simulación fluidodinámica y por otra, pruebas sobre un modelo a escala para validar las predicciones. En este trabajo solo se utiliza una fase líquida.

La presente investigación, propone la construcción de una planta a escala, para evaluar el desempeño del controlador predictivo de sistemas híbridos, considerando la dinámica de agitación de fases líquidas. La sección 2 describe la planta a escala. Tomando en cuenta la complejidad encontrada al momento de medir las alturas de las fases líquidas en forma automatizada, en la subsección 2.2 se describe un método para determinar las fases presentes. Si bien en la literatura se encuentran distintas técnicas para medir las alturas de fases líquidas en columnas verticales, en la planta a escala existen dificultades en la medición asociadas a la geometría del reactor junto a diferencias de agitación en el interior del reactor.

2. Planta piloto

Se construyó una planta piloto para evaluar el desempeño de la técnica de control predictivo de sistemas híbridos sobre el proceso de separación gravitacional. La planta no realiza la fusión de concentrados de cobre por la complejidad técnica que involucra trabajar a altas temperaturas. Sin embargo, la planta utiliza líquidos inmiscibles a temperatura ambiente para centrar el estudio al control de los niveles de fases líquidas, especialmente cuando el reactor es sometido a la agitación con toberas sumergidas. El énfasis de este estudio está en la incorporación de la fase emulsión que no ha sido considerada en investigaciones previas.

2.1. Descripción de la planta a escala

En la planta a escala se probaron 3 reactores construidos en diferentes materiales, los cuales, permitieron observar la fluidodinámica del reactor desde variadas perspectivas. Los dos primeros modelos poseen una sección del manto de vidrio, que permitió observar cómo se propaga la fase emulsión desde la

zona de agitación hasta la zona de extracción en el lado opuesto. Estos modelos fueron utilizados en pruebas dinámicas en lazo abierto.

En la implementación del sistema de control se utilizó el tercer modelo a escala. Con el objetivo de reducir las perturbaciones de luz sobre el sistema visión digital, el nuevo modelo se construyó con paredes opacas que impedían el ingreso de la luz al interior del reactor. La Figura 3 muestra el tercer modelo utilizado en la planta a escala. En el tercer modelo, se colocó una franja vertical de vidrio en la pared opuesta a la zona de gran agitación, que permitía medir los niveles. Además, la extracción de producto se realiza con tubos verticales posicionados a diferentes alturas para emular las compuertas.



Figura 3: Fotografía del tercer modelo a escala.

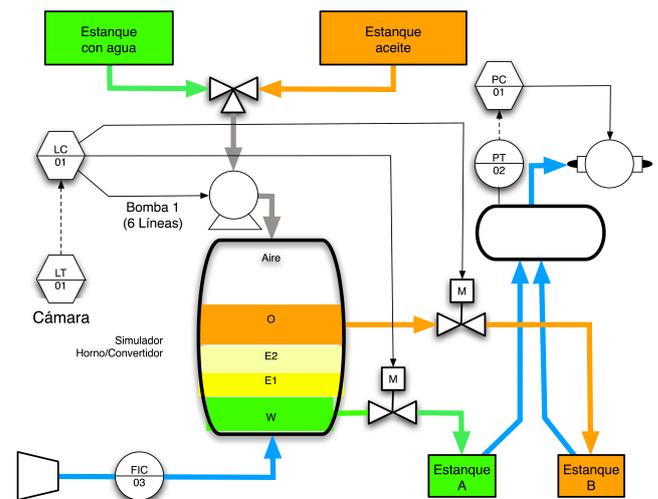


Figura 4: Esquema general de la planta piloto. En el reactor se presentan las cuatro fases: aceite (O), emulsión tipo 2 (E2), emulsión tipo 1 (E1) y agua (W).

Con el objetivo de manipular el comportamiento del reactor a escala se instalaron elementos de automatización para regular el ingreso y la salida de productos. En la Figura 4 se muestra un esquema general de todos los elementos que constituyen la planta piloto. La planta está constituida por tres lazos de control. El lazo de control 01 utiliza como sensor, el sistema de visión digital. Además, el controlador de nivel se implementó en un computador que acciona dos válvulas motorizadas y una bomba peristáltica de 6 líneas paralelas. La medición de los niveles de llenado de las diferentes fases líquidas constituye un elemento esencial para controlar en forma óptima el proceso de separación gravitacional. La cámara, la lámpara LED y el

computador (PC) de la planta, constituyen el sistema de medición de los niveles de fases líquidas. En la subsección 2.2 se describe en detalle el sistema de visión artificial empleado en la medición de los niveles de llenado.

Las válvulas motorizadas son programadas para operar en dos estados discretos: cerradas o abiertas. La bomba peristáltica y las dos válvulas motorizadas son controladas por un computador a través de una tarjeta de adquisición de datos (marca: Measurement Computing, modelo: USB-1208FS). La bomba 1 es de tipo peristáltica con 6 líneas de fluido. Esta bomba regula el flujo de mezcla que ingresa a la celda. La mezcla ingresa al reactor a través de un orificio de alimentación ubicado en la parte superior.

El lazo de control 02 emplea una bomba de vacío como actuador y un sensor de presión absoluta. El lazo de control 02 se implementó para facilitar la extracción de productos desde el reactor, debido a que al escalar el modelo respecto al tamaño real del Convertidor Teniente, se reduce la presión hidrostática en las compuertas de extracción de productos. Para solucionar este inconveniente se incorporó una bomba de vacío en el montaje experimental, que extrae el aire de los estanques A y B. La presión negativa fue regulada con un controlador tipo on-off. El controlador del lazo 02 se implementó en un PC con el software LabVIEW. Los productos extraídos son depositados en los estanques A y B, respectivamente.

En este modelo a escala se incorporó una zona de toberas para recrear la agitación de fases líquidas. El lazo de control 03 regula el flujo de aire que ingresa al reactor. Se utiliza un compresor de aire para agitar una zona del reactor. En el modelo a escala se utiliza dos líquidos inmiscibles (aceite vegetal y agua destilada). La agitación generada por la inyección de aire a través de las toberas sumergidas produce una capa de emulsión entre las dos fases líquidas iniciales, como muestra la Figura 5.

2.2. Medición de los niveles

Se desarrolló un sistema de visión digital para medir los niveles de fases líquidas en el interior del reactor. Como al interior del modelo a escala se observan zonas con distinta agitación se utilizará la zona más alejada de las toberas para realizar la captura de imágenes. Se emplea una cámara de alta definición de 1280 x 720 píxeles para adquirir imágenes de las alturas de las fases líquidas. La cámara se gira en 90° para aprovechar la orientación que posee el mayor número de píxeles y de esta manera aumentar la resolución en la medición de niveles. La resolución en la medición ΔL se puede calcular en función de la longitud del campo de visión vertical L_v y el número de píxeles de la cámara en esa orientación como:

$$\Delta L = \frac{L_v}{N^\circ \text{ Pixel}} \quad (1)$$

Una regla fue posicionada verticalmente en el área de visión para calibrar el sistema de visión artificial. En el procedimiento de calibración, se adquiere una imagen y se analizan cuántos píxeles equivalen a una longitud de un milímetro. El promedio del número de píxeles por milímetro permitió estimar la resolución del sistema de visión en 59 μm por píxel. Esta técnica de calibración también permite detectar la existencia de aberraciones geométricas en la adquisición de imagen.

Un aspecto importante del sistema de visión digital lo constituye la lámpara de iluminación. Se evaluaron diferentes métodos de iluminación considerando iluminación interna y externa al reactor. En el caso del tercer modelo a escala, se utilizó iluminación externa con luz LED blanca. Se iluminó en forma oblicua la pared lisa con la ventana de vidrio. La Figura 5 muestran el campo de visión del tercer modelo a escala en distintos estados de agitación.

Un algoritmo de procesamiento de imágenes se implementó para detectar las alturas donde se produce el cambio de interfase. La principal dificultad de este algoritmo, radica en las diferentes posibilidades de llenado que pueden presentarse. La inyección de aire a través de toberas sumergida provoca la formación de la fase emulsión al interior del reactor. Al analizar detalladamente de las propiedades visuales de la emulsión, se caracterizaron dos tipos diferentes de emulsiones. Un tipo de emulsión posee un color blanco y una distribución homogénea. Por otra parte, se detectó la presencia de una emulsión muy irregular, caracterizada por la presencia de burbujas de gran tamaño. La inestabilidad de las emulsiones dificultan el proceso de medición de fases (McClements, 1998).

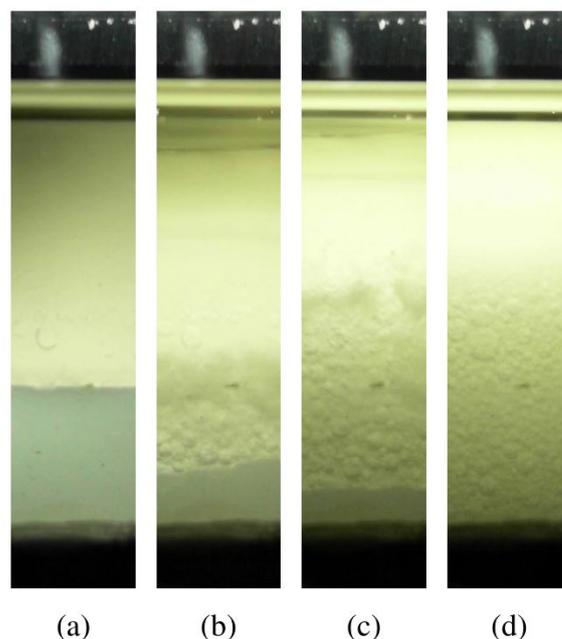


Figura 5: Fotografías con cuatro tipos de llenado del reactor. En (a) se muestran el estado O/W, en (b) se muestra el estado O/E2/W, en (c) se muestra el estado O/E1/E2/W y finalmente en (d) se muestra el estado O/E1/E2.

En la Figura 5, se presentan diferentes fotografías de la evolución de las fases líquidas en función de la agitación utilizada. En la Figura 5(a) se muestra la presencia de las fases aceite y agua (O/W). Al agitar aparece la fase emulsión, la cual avanza desde la zona de mayor agitación hasta la ventana de observación. La aparición de la emulsión puede apreciarse en la Figura 5(b). Al continuar agitando el reactor, la fase agua disminuye y en su reemplazo se observa un aumento de la fase emulsión en la Figura 5(c). Finalmente, se observa en la Figura 5(d) que no es perceptible la fase agua. Observando en detalle las imágenes, se distinguen dos tipos de emulsión: en la parte superior existe

un tamaño de burbuja muy pequeño que muestra un aspecto homogéneo y en la parte inferior se observa una emulsión con un tamaño de burbujas del orden de 1 a 4 mm. La emulsión superior con aspecto homogéneo, se denominara como emulsión tipo 2 (E2), mientras que la emulsión con burbujas de gran tamaño se denominara emulsión tipo 1 (E1).

Considerando la presencia de 4 fases se obtiene 16 estados posibles de llenados. Si bien en una operación normal los estados de llenados aceptados son solo dos (O/E1/E2/W y O/E1/W), es posible que el reactor pase a estados no deseados por la elección incorrecta de las variables manipuladas. La Figura 6, muestra los distintos tipos de llenado del reactor en función del número de fases presentes. Los colores, en la Figura, distinguen modos de llenados: **normales** en color verde, **críticos** en color amarillo y **prohibidos** en color rosado. Sin color se representa el estado del reactor sin contenido o vacío.

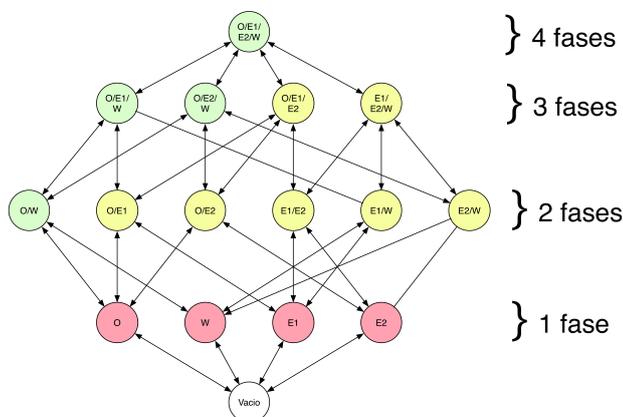


Figura 6: Diagrama que muestra diferentes estados de llenado en función del número de fases presentes en el reactor. Se consideran las fases: aceite (O), Emulsión tipo 1 (E1), emulsión tipo 2 (E2) y agua (W).

El algoritmo de procesamiento de imágenes debe detectar las fases presentes en el reactor para posteriormente aplicar un método de análisis de interfases particular a cada estado discreto de llenado. La primera etapa del algoritmo consiste en recortar una ventana de la imagen original. En una segunda etapa, se promedian las intensidades de los canales de los colores: rojo, verde y azul en forma horizontal. Este procedimiento evita que las burbujas individuales puedan alterar la medición de niveles. La operación promedio entrega como resultado 3 vectores de intensidades para cada uno de los canales. En la tercera etapa, se realiza la derivada numérica sobre cada uno de los vectores de las intensidades.

En una cuarta etapa del algoritmo, se busca la presencia de la emulsión tipo 2 (E2) empleando filtro de detección de bordes para identificar la presencia de burbujas de gran tamaño. En una quinta etapa se clasifica el tipo de llenado tomando en cuenta el vector que describe la presencia de emulsión tipo 2, los vectores de intensidades y los vectores de la derivada por cada canal de color. En la sexta etapa, se aplica un método de detección de interfases particular para cada tipo de llenado. Esta etapa finaliza con la entrega de las posiciones verticales donde se encuentran los cambios de fases.

2.3. Relación entre el nivel y el volumen de llenado

Con el objetivo de obtener una relación matemática que vincule la altura total (o el nivel de llenado) con el volumen, se realizó un procedimiento de llenado paulatino del reactor, mientras se realizaban mediciones con el sistema de visión digital. En este procedimiento no se utilizó la inyección de aire para evitar el oleaje en el interior del reactor que genera una dispersión en las medidas de nivel. En la Figura 7 se muestran los datos obtenidos en la calibración junto a dos modelos de ajuste.

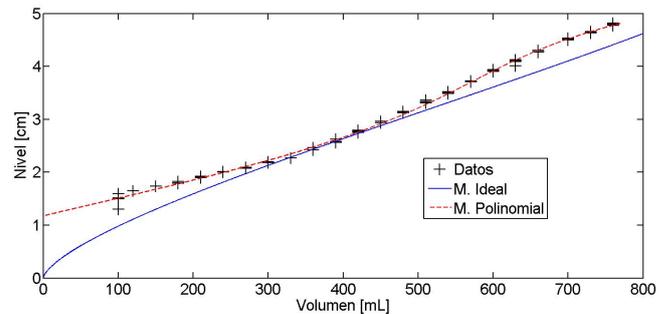


Figura 7: Gráfico de la relación del nivel medido con el sistema de visión digital en función del volumen de líquido, junto a modelos idealizado y un modelo de ajuste de polinomio de orden 4.

El modelo ideal descrito en la Figura 7 corresponde a la relación geométrica para un cilindro recostado (o tanque horizontal). Por otra parte, el modelo de ajuste polinómico de orden 4, se muestra en línea segmentada. La ecuación 2 describe la altura y en función del volumen x .

$$y = g(x) = a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (2)$$

los valores obtenidos de los coeficientes son:

$$a_4 = -3,4682 \cdot 10^{-11} \text{ cm/mL}^4$$

$$a_3 = 5,2153 \cdot 10^{-8} \text{ cm/mL}^3$$

$$a_2 = -2,1672 \cdot 10^{-5} \text{ cm/mL}^2$$

$$a_1 = 6,6851 \cdot 10^{-3} \text{ cm/mL}$$

$$a_0 = 1,1273 \text{ cm}$$

La relación obtenida experimentalmente es de gran utilidad para vincular las predicciones de los volúmenes producidos con la evolución futura de los niveles de fases líquidas. Empleando la medición de niveles, se procederá a desarrollar un controlador predictivo basado en modelo. La obtención del modelo se realizará empleando la técnica de respuesta al escalón a través de cambios en las variables manipuladas de la planta.

3. Modelo de operación del reactor

Se desarrolló un modelo operacional del reactor para diseñar en un controlador predictivo. El modelo describe la evolución de las alturas de las fases líquidas en función de las variables manipuladas como el flujo de mezcla que ingresa y los flujos de productos que salen del reactor. Con la finalidad de definir las abreviaciones y símbolos, se presenta la Tabla 1.

En el montaje experimental son medidas las alturas máximas de cada fase líquida. Estas mediciones se podrán comparar con las predicciones del modelo. El modelo operacional del separador de fases se plantea en el concepto de variable de estado.

Las variables de estado del modelo son los volúmenes de cada fase líquida. Los volúmenes de las diferentes fases serán estimados debido a que no pueden medirse directamente.

El cambio en los volúmenes (X) depende de las variables manipuladas (U). A partir de la construcción de la planta se especifican tres variables manipuladas. La variable manipulada u_1 regula el flujo de mezcla que ingresa al reactor. El flujo de mezcla se caracteriza por las concentraciones relativas de aceite (O) y agua (W). Las concentraciones relativas c_O y c_W ponderan el flujo de entrada para aumentar los volúmenes de las fases. En el sistema de extracción, las variables manipuladas u_2 y u_3 presentan estados discretos, por este motivo es necesario introducir el valor de los flujos F_A y F_B como parámetros del modelo.

Tabla 1: Símbolos empleados.

Parámetros de la planta a escala	
h_A	Altura de la compuerta A
h_B	Altura de la compuerta B
Variables del modelo	
Y	Vector de las variables de salida del modelo
y_1	Altura máxima de la fase agua (W) cm
y_2	Altura máxima de la fase emulsión tipo 1 (E1) cm
y_3	Altura máxima de la fase emulsión tipo 2 (E2) cm
y_4	Altura máxima de la fase aceite (O) cm
X	Vector de estado del modelo $X = [x_1, x_2, x_3, x_4]$
x_1	Volumen de la fase agua (W) mL
x_2	Volumen de la fase emulsión tipo 1 (E1) mL
x_3	Volumen de la fase emulsión tipo 2 (E2) mL
x_4	Volumen de la fase aceite (O) mL
U	Vector de variables manipuladas $U = [u_1, u_2, u_3]$
u_1	Flujo de mezcla mL/min
u_2	Comando de apertura y cierre de la compuerta inferior A (1: abierta/ 0: cerrada)
u_3	Comando de apertura y cierre de la compuerta superior B (1: abierta/ 0: cerrada)
c_W	Concentración relativa de agua en la mezcla
c_O	Concentración relativa de aceite en la mezcla
Δt	Tiempo de muestreo
F_A	Flujo extraído por la compuerta A
F_B	Flujo extraído por la compuerta B
p_1	Perturbación debida al flujo de aire
γ_j	Volumen de la fase j que pasa a otra fase
\hat{y}_j	Predicción de la variable controlada j
Variables del controlador Predictivo	
J	Función objetivo del controlador predictivo
N_y	Número de variables controladas
N_u	Número de variables manipuladas
N_p	Horizonte de predicción
N_c	Horizonte de control
w_j	Referencia de las variables controladas
q_{ij}	parámetro de la función objetivo de la variable controlada
r_{ij}	parámetro de la función objetivo de la variable controlada
g_{ij}	parámetro de la función objetivo de la variable controlada j en el instante i

Las compuertas de extracción se ubican a distintas alturas para permitir la separación gravitacional de los productos. La altura de la compuerta inferior es h_A y la altura de la compuerta superior es h_B .

El tipo de fase extraída por cada compuerta depende del nivel de cada fase líquida y de las alturas donde se ubican las dos compuertas. Se utilizan dos vectores δ_{AY} y δ_{BY} con variables discretas auxiliares para describir el producto que podría ser extraído por cada compuerta. A continuación las funciones afines 3 y 4 describen los valores de los vectores δ_{AY} y δ_{BY} en función de los niveles Y y de las alturas de las compuertas h_A y h_B .

$$\delta_A = \begin{cases} \delta_{A1} = 1; \delta_{A2} = 0; \delta_{A3} = 0; \delta_{A4} = 0, & \text{if } y_1 \geq h_A \\ \delta_{A1} = 0; \delta_{A2} = 1; \delta_{A3} = 0; \delta_{A4} = 0, & \text{if } y_1 \leq h_A \leq y_2 \\ \delta_{A1} = 0; \delta_{A2} = 0; \delta_{A3} = 1; \delta_{A4} = 0, & \text{if } y_2 \leq h_A \leq y_3 \\ \delta_{A1} = 0; \delta_{A2} = 0; \delta_{A3} = 0; \delta_{A4} = 1, & \text{if } y_3 \leq h_A \leq y_4 \\ \delta_{A1} = 0; \delta_{A2} = 0; \delta_{A3} = 0; \delta_{A4} = 0, & \text{if } y_4 \leq h_A \end{cases} \quad (3)$$

La misma estructura se aplica a la compuerta B

$$\delta_B = \begin{cases} \delta_{B1} = 1; \delta_{B2} = 0; \delta_{B3} = 0; \delta_{B4} = 0, & \text{if } y_1 \geq h_B \\ \delta_{B1} = 0; \delta_{B2} = 1; \delta_{B3} = 0; \delta_{B4} = 0, & \text{if } y_1 \leq h_B \leq y_2 \\ \delta_{B1} = 0; \delta_{B2} = 0; \delta_{B3} = 1; \delta_{B4} = 0, & \text{if } y_2 \leq h_B \leq y_3 \\ \delta_{B1} = 0; \delta_{B2} = 0; \delta_{B3} = 0; \delta_{B4} = 1, & \text{if } y_3 \leq h_B \leq y_4 \\ \delta_{B1} = 0; \delta_{B2} = 0; \delta_{B3} = 0; \delta_{B4} = 0, & \text{if } y_4 \leq h_B \end{cases} \quad (4)$$

Los volúmenes de cada una de las fases son modelados de la siguiente manera:

$$x_1(t+1) = x_1(t) + c_W \Delta t u_1(t) - F_A \Delta t \delta_{A1} u_2(t) - F_B \Delta t \delta_{B1} u_3(t) - \gamma_1(p_1(t)) \quad (5)$$

$$x_2(t+1) = x_2(t) - F_A \Delta t \delta_{A2} u_2(t) - F_B \Delta t \delta_{B2} u_3(t) - \gamma_2(p_1(t)) \quad (6)$$

$$x_3(t+1) = x_3(t) - F_A \Delta t \delta_{A3} u_2(t) - F_B \Delta t \delta_{B3} u_3(t) - \gamma_3(p_1(t)) \quad (7)$$

$$x_4(t+1) = x_4(t) + c_O \Delta t u_1(t) - F_A \Delta t \delta_{A4} u_2(t) - F_B \Delta t \delta_{B4} u_3(t) - \gamma_4(p_1(t)) \quad (8)$$

El flujo de aire inyectado a través de las toberas sumergidas se considera como una perturbación no medida (p_1) en el esquema de la planta. La agitación que genera la inyección de aire tiene efectos sobre la interacción entre las fases líquidas, lo cual, introduce una gran complejidad en el modelo. Por este motivo, se han incorporado las funciones γ_i para describir los cambios de volúmenes como perturbación.

Las alturas de las fases líquidas se calculan a partir de los volúmenes, utilizando la calibración obtenida en la sección 2.3. La función no lineal $g(x)$ se emplea para proyectar los estados y así obtener los niveles de fases líquidas.

$$y_1 = g(x_1) \quad (9)$$

$$y_2 = g(x_1 + x_2) \quad (10)$$

$$y_3 = g(x_1 + x_2 + x_3) \quad (11)$$

$$y_4 = g(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \quad (12)$$

A continuación se presentan pruebas experimentales sobre la planta a escala, que permiten obtener varios parámetros del modelo.

3.1. Estimación de los parámetros del modelo empleando pruebas dinámicas sobre la planta

A continuación se describen diferentes respuestas dinámicas obtenidas al someter la planta a cambios tipo escalón en las variables de entrada. Con el objetivo de obtener los parámetros c_A y c_B se realizan diferentes pruebas de llenado con diferentes flujos de manera de determinar cuáles son los incrementos relativos de agua y aceite en cada fase. En las pruebas se configuró la bomba peristáltica con 3 líneas de agua y 3 líneas de aceite. Con esta configuración se obtuvieron los siguientes valores $c_A = 0.30$ y $c_B = 0.70$. En la misma prueba de llenado se determinó el flujo máximo que ingresa al reactor $u_{1max} = 10$ mL/s.

Posteriormente se realizaron pruebas de extracción de productos, las cuales arrojaron los valores de los flujos extraídos $F_A = 3.1$ mL y $F_B = 8.1$ mL. Además la prueba de extracción de la fase menos densa permite obtener el valor de la altura de la puerta superior $h_B = 3.5$ cm.

3.2. Respuesta de los niveles de fases líquidas frente a un cambio en el flujo de aire de agitación

Se diseñó un experimento que describe el comportamiento de los niveles de las fases líquidas cuando el reactor se somete a una perturbación tipo escalón, que modificó el flujo de aire desde 0 L/min a 30 L/min por un tiempo de 30 minutos, posteriormente el flujo de aire se lleva a 0 L/min registrando la evolución de los niveles durante la relajación. La Figura 8 muestra la evolución de los niveles durante este experimento. La misma Figura muestra también la evolución durante la relajación, es decir, cuando la agitación fue apagada.

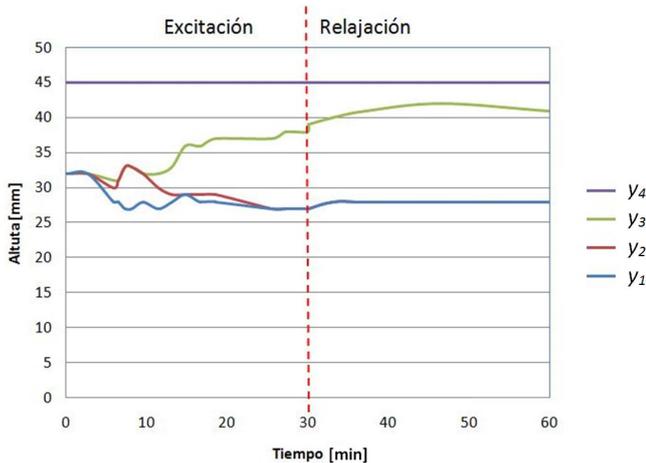


Figura 8: Gráfico de los niveles de fases líquidas cuando el reactor se somete a la perturbación de la agitación.

La respuesta muestra que existe un retardo en el transporte de las fases emulsión desde la zona de alta agitación hasta el extremo opuesto del reactor. Este retardo en la respuesta tiene una duración de 4 minutos. Los primeros cambios muestran la aparición de la fase emulsión caracterizada por burbujas de gran tamaño. Posteriormente la emulsión tipo 1 desaparece dando paso a la formación de la emulsión más estable denominada tipo 2. Después de apagar la agitación, se observa que la cantidad de emulsión sigue aumentando debido al retardo en el transporte

desde la zona de agitación hasta el extremo opuesto del reactor. Se puede afirmar que la degradación de la fase emulsión de tipo 2 en sus componentes iniciales, es un proceso lento.

La siguiente sección describe el desarrollo de un controlador para el proceso, basado en los datos obtenidos en las respuestas dinámicas.

4. Control predictivo híbrido

A continuación se describe la implementación de un controlador predictivo del proceso de separación gravitacional, el cual, se centra en la coordinación entre el ingreso continuo de materiales y las extracciones intermitentes de productos. Además se incluyen las restricciones operacionales que involucran los niveles de fases líquidas. El control predictivo fue implementado en la herramienta Multi Parametric Toolbox (Herceg et al., 2013).

4.1. Modelo predictivo del controlador

El modelo del control predictivo empleado en esta investigación utiliza el lenguaje de modelación HYSDEL (HYbrid Systems Description Language) desarrollado por Torrisi F.D. y Bemporad A. (2004). Para simplificar el diseño del controlador predictivo, se realizaron las siguientes adecuaciones al modelo. En primer lugar, se redujo el número de estados de llenado del reactor al considerar ambos tipos de emulsión como una sola fase ($x_{23} = x_2 + x_3$) para el modelo del controlador. Esta adecuación reduce de 16 estados de llenado posible solo a 9 estados.

En las ecuaciones 13, 14 y 15 se presenta el modelo simplificado en condiciones normales de operación, cuando $\delta_A = [1, 0, 0, 0]$ y $\delta_B = [0, 0, 0, 1]$.

$$X(t+1) = A X(t) + B U(t) \quad (13)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{pmatrix} c_A \Delta t & -F_A \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c_B \Delta t & 0 & -F_B \Delta t \end{pmatrix} \quad (15)$$

Si cambian las fases presentes en el reactor o se modifican los vectores δ_A y δ_B , se debe calcular nuevamente la matriz B.

En segundo lugar, se emplean modelo lineales en sustitución de la función no lineal $g(x)$. En la linealización se obtienen las pendientes m_j y los interceptos n_j en torno a la altura de cada fase j .

$$y_1 = m_1 x_1 + n_1 \quad (16)$$

$$y_{23} = m_{23} (x_1 + x_{23}) + n_{23} \quad (17)$$

$$y_4 = m_4 (x_1 + x_{23} + x_4) + n_4 \quad (18)$$

En cada instante en la ejecución del controlador se obtienen los valores de los siguientes parámetros: $m_1, m_{23}, m_4, n_1, n_{23}$ y n_4 .

Reescribiendo el modelo de operación en forma matricial se tiene:

$$Y(t) = C X(t) + D U(t) + f \quad (19)$$

donde

$$C = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ m_{23} & m_{23} & 0 \\ m_4 & m_4 & m_4 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$f = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_{23} \\ n_4 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Como tercera adecuación del modelo, se utiliza una estimación en línea de los estados (o volúmenes) a partir de las mediciones periódicas de los niveles. Esta metodología reduce el efecto de la perturbación p_1 . El efecto de la perturbación se evalúa considerando la estimación del modelo ($\hat{y}_j(t|t-1)$) y la medición de los niveles ($y_1(t)$) como:

$$\hat{y}d_1(t+i|t) = \hat{y}_1(t|t-1) - y_1(t) \quad (23)$$

$$\hat{y}d_{23}(t+i|t) = \hat{y}_{23}(t|t-1) - y_{23}(t) \quad (24)$$

$$\hat{y}d_4(t+i|t) = \hat{y}_4(t|t-1) - y_4(t) \quad (25)$$

Los errores estimados de los niveles $\hat{y}d_j(t+i|t)$ son incorporados en la matriz f del modelo general.

4.2. Función objetivo del controlador predictivo

La función objetivo del controlador predictivo consta de dos contribuciones, una que considera la desviación de las variables controladas respecto a sus referencias w_j y una segunda contribución del esfuerzo en control. En el control de los niveles de fases líquidas se utiliza referencias fijas en el tiempo w_j . Estas referencias son seleccionadas de acuerdo a las posiciones de los pasajes de extracción.

$$J = \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_p} q_{ij} \cdot (y_j(t+i|t) - w_j(t+i|t))^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{i=0}^{N_c} r_{ik} \cdot u_k(t+i|t)^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{i=0}^{N_c} g_{ik} \cdot \Delta u_k(t+i|t)^2 \quad (26)$$

Los parámetros q_{ij} , r_{ik} y g_{ik} ajusta el grado de relevancia de cada de cada una de las variables en la función objetivo.

4.3. Restricciones al problema de control

La extracción selectiva de los productos depende considerablemente de los niveles de las fases líquidas, debido a que las salidas de productos se encuentran ubicadas a alturas fijas. Esta condición operacional se incorpora en el diseño del controlador predictivo al emplear restricciones sobre las variables controladas ($Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$).

$$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 1,1 \\ 3,5 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_1 \\ y_{23} \\ y_4 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 5,0 \\ 5,5 \\ 6,0 \end{bmatrix}, \text{ cm} \quad (27)$$

El nivel mínimo de la fase agua debe ser mayor a la altura de la compuerta inferior ($y_{1min} > h_A$). En el reactor, el valor de $h_A = 0.4$ cm. Con el objetivo de evitar la extracción de emulsión

a través de compuerta A, se incorpora la siguiente restricción sobre la variable manipulada discreta u_2 .

$$\text{if } y_1 \leq h_a \Rightarrow u_2 = 0 \quad (28)$$

Por otra parte, la altura de la compuerta B limita la evolución de los niveles, especialmente a la mínima altura de nivel total (y_{4min}) y la máxima altura de las fases agua y emulsión (y_{1max}, y_{23max}).

$$\text{if } (y_4 \leq h_b \vee y_{23} \geq h_b) \Rightarrow u_3 = 0 \quad (29)$$

Esta restricción evita la extracción de emulsión por la compuerta B y la apertura de la compuerta B cuando no es posible extraer la fase superior.

Una de las principales restricciones operacionales del Convertidor Teniente, establece que el flujo de entrada no puede ser nulo para evitar que las toberas se bloqueen con el enfriamiento del baño fundido. En la planta a escala se utiliza un valor $u_{1min} = 0.5$ mL/s para recrear esta condición operacional.

La principal problemática de control lo constituyen la extracciones de productos desde el reactor. Si bien en el modelo a escala se puede extraer materiales en cualquier momento sin restricciones. Al momento de recrear las condiciones operacionales de reactor real utilizado en fundición, aparecen diversas restricciones relacionadas con la operación de los procesos dependientes. En las fundiciones de cobre que utilizan Convertidor Teniente, el producto más denso (metal blanco) es procesado en los convertidores Pierce Smith (CPS), mientras que el producto menos denso (escoria) es tratado en los hornos de limpieza de escoria (HLE). Se debe destacar que ambos procesos aguas abajo del CT operan en régimen batch o por lotes. Esto implica que deben extraerse un número limitado de ollas desde el CT para iniciar el proceso en los CPS y HLE. Por otra parte, si no existe disponibilidad en los procesos aguas abajo para aceptar la carga del CT, no puede realizarse la extracción de productos desde el CT. En este esquema de producción global, el número de convertidores Pierce-Smith y el número de hornos de limpieza de escoria condicionan la operación del CT. Si las unidades aguas abajo han iniciado sus procesos de refinación no están disponibles para aceptar nuevas cargas, por lo cual, la extracción de productos desde el CT queda restringida.

4.4. Desempeño en lazo cerrado

Las tareas del sistema de visión artificial y el algoritmo de control predictivo se realizaron en un computador. Los tiempos de ejecución de ambos procesos determinan un tiempo de muestreo mínimo Δt_{min} . La pruebas fueron realizadas con un computador con procesador AMD FX(tm)-4300 Quad-Core de 3.80 GHz y 8 GB de memoria RAM, en el cual, se obtuvo un tiempo mínimo de $\Delta t_{min} = 7.3$ s. En promedio se emplean 2.6 segundo en el algoritmo de visión y 4.7 segundos en el algoritmo de control.

Modificando los parámetros de la función objetivo se adapta la producción. La producción se evalúa en función del número de veces en que se realiza las extracciones de productos. En la Figura 9 se muestra el desempeño del controlador en lazo cerrado cuando se privilegia el aumento de producción. Esta configuración del controlador genera variaciones en el flujo de mezcla que ingresan u_1 al reactor.

Por otra parte, en la prueba que muestra la Figura 10 se aprecia el efecto de aumentar la ponderación en el esfuerzo en control (r_{ik} y g_{ik}) en la función objetivo. En esta prueba se restringe el flujo de mezcla u_1 y se reduce la producción. Ambas pruebas se realizaron con un horizonte de predicción $N_p = 5$ y un horizonte de control $N_c = 4$. El horizonte temporal de predicción es de 36.5 segundos.

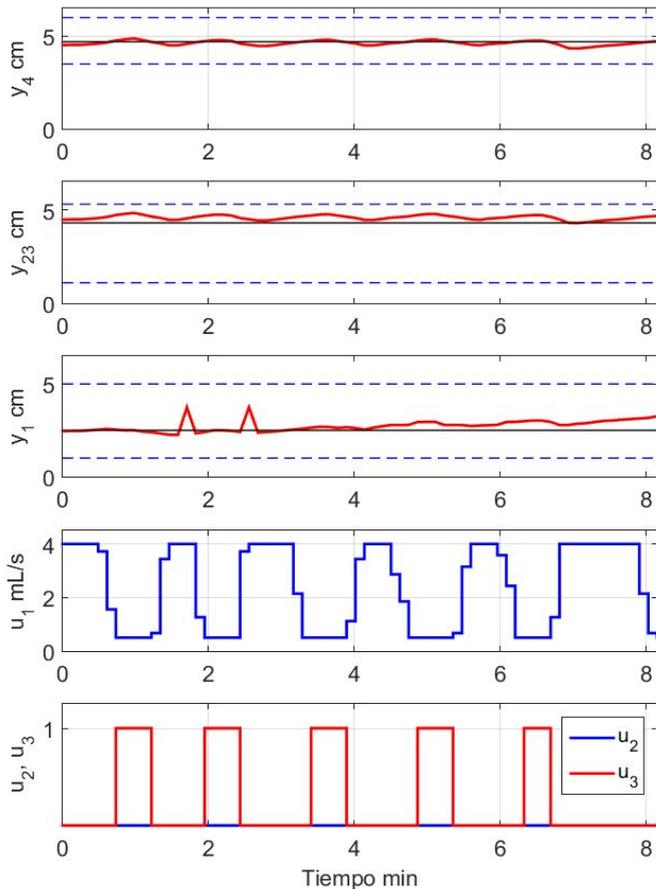


Figura 9: Respuesta del controlador en lazo cerrado. En los tres primeros gráficos se presenta la evolución de los niveles. En el cuarto gráfico se muestra el flujo de mezcla (u_1) y en el quinto gráfico se muestran las extracciones de productos (u_2 y u_3).

En la implementación del controlador aparecieron dos inconvenientes. El primer inconveniente se relaciona con la dificultad para configurar restricciones variantes en el tiempo para las variables manipuladas discretas en la herramienta MPT. Era necesario emplear restricciones variantes sobre el horizonte de predicción para representar los modelos de disponibilidad de los procesos aguas abajo.

Como alternativa, se utilizaron restricciones constantes sobre el horizonte de predicción. Con esta metodología, surge el segundo inconveniente. En algunas situaciones el controlador no obtiene solución, cuando los niveles son elevados y están activas las restricciones sobre extracciones de productos.

5. Conclusiones

La construcción de la planta a escala ha permitido simular el comportamiento de las fases líquidas en el interior de un

reactor con la geometría de un convertidor tipo Teniente. Un sensor de niveles basado en visión digital permitió registrar el comportamiento de las fases líquidas, especialmente la fase emulsión. Las pruebas experimentales muestran dos tipos emulsiones, este hallazgo aumentó la complejidad del algoritmo de procesamiento de imágenes que mide las alturas de las diferentes interfaces.

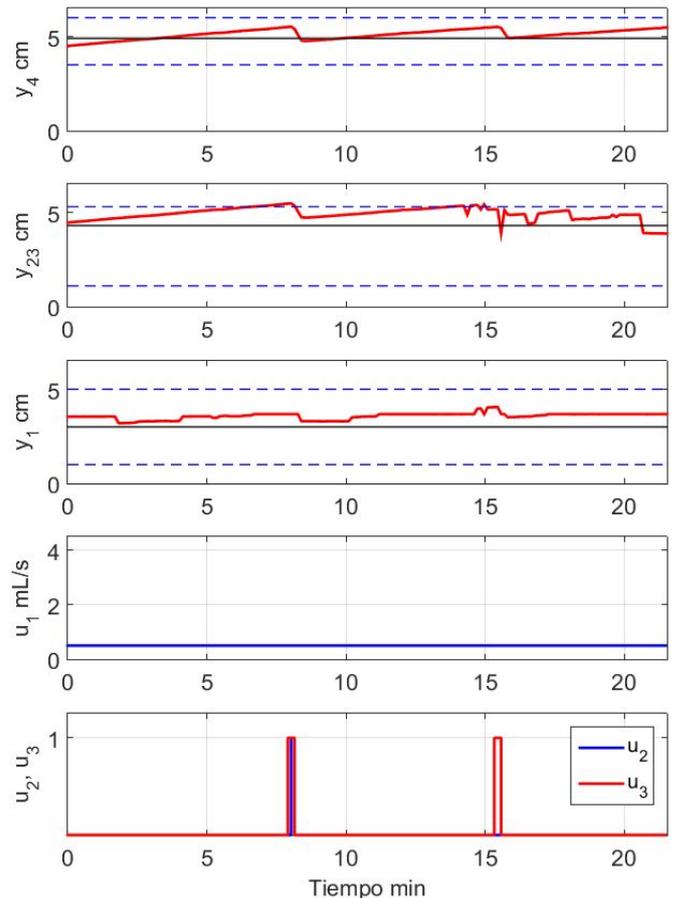


Figura 10: Respuesta del controlador en lazo cerrado. En los tres primeros gráficos se presenta la evolución de los niveles. En el cuarto gráfico se muestra el flujo de mezcla (u_1) y en el quinto gráfico se muestran las extracciones de productos (u_2 y u_3).

El sensor de niveles basado en visión digital ha permitido medir las respuestas dinámicas frente a diferentes cambios en las variables de operación. En especial, se midió el tiempo involucrado en el transporte de la fase emulsión desde la zona de alta agitación hasta la zona de medición de los niveles. Los desarrollos industriales para medir en línea los niveles de fases líquidas a altas temperaturas podrían enfrentarse a la detección de la fase emulsión con propiedades distintas a las fases metal blanco y escoria. La metodología presentada en este trabajo podría incorporarse en el desarrollo de un controlador para fundiciones de cobre.

En condiciones normales, el controlador predictivo permite regular la tasa de producción al variar los parámetros de la función objetivo.

La utilización del toolbox MPT ha mostrado limitaciones en

la implementación del controlador de niveles, específicamente al gestionar restricciones variables en el tiempo, que afectan las extracciones de productos desde el reactor.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo recibido de la Universidad de Atacama a través del proyecto DIUDA 22260.

Referencias

- Almaraz A., López C., Barron M.A., Plascencia G., 2013. Numerical and Physical Model of Turbulence in a Peirce-Smith Copper Converter. *Journal of Material Science and Engineering*, 510–518.
- Alvarado R. y Godoy J., 1999. New Strategic Scope of the Calteones Smelter Development. En D. George. (Ed.). *Fourth International Conference Copper 99 V*, 47–55. Phoenix, EEUU: The Minerals Metals and Materials Society.
- Barriga J., Ruz P., Fuentes C., Hentzschel, 2007. Phase level system.
- Bemporad A. y Morari M., 1999. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica* 35 (3), 407–427.
- Cain S., Budman H., Pritzker M., December 1996. On line estimation of matte grade in a copper smelter. *The Canadian Journal of chemical engineering* 74, 993–1003.
- Camacho E. y Bordons C., 2004. *Model Predictive Control*, 2a Edition. Eds. Springer-Verlag, London, United Kingdom.
- Campos R. y Torres L., 1993. Calteones Smelter: Two decades of Technological Improvements. En C. Landolt (Ed.). *Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt*, Paul E. Queneau International Symposium, 1441–1460. Warrendale, Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society of the AIME.
- De Prada, C., Grossmann I., Sarabia D., Cristea S., 2009. A strategy for predictive control of a mixed continuous batch process. *Journal of Process Control* 19 (1), 123–137.
- Gajardo M., 2008. Multivariable control application at Codelco Norte's Teniente converter N°2. En F. Romero (Ed.). *The I International Congress on Automation in the Mining Industry*, 335–342. Santiago, Chile: Gecamin Ltd.
- Graham C., Goodwin, Kwai Sang Sin, 1984. *Adaptive filtering prediction and control*. Prentice Hall.
- Herceg, M., Kvasnica, M., Jones, C., Morari, M., July 17–19 2013. Multi-Parametric Toolbox 3.0. In: *Proc. of the European Control Conference*. Zürich, Switzerland, pp. 502–510.
- Mackey P.J. y Campos R., 2001. Modern continuous smelting and converting by bath smelting technology. *Canadian Metallurgical Quarterly* 40, 355–376.
- McClements, D. J., 1998. *Food Emulsions: Principles, Practice and Techniques*. Minergía, 2005. *Invensys Chile implementa piloto automático en Convertidor Teniente N°1 en Calteones*. *Minergía* 9, 6–7.
- Morari M. y Baric M., September 2006. Recent developed in the control of constrained hybrid systems. *Computer & Chemical Engineering* 30 (10-12), 1619–1631.
- Paredes L. y Zolezzi A., 2003. System for non-invasive online discrete measurement of phase levels in converters or pyrometallurgical furnaces.
- Sadri A., Shamel E., Wasmund B., Voermann, N, August 2010. Electromagnetic bath level measurement for pyrometalpyrometa furnace.
- San Martín J., Saouri F., Benaddi A., Conca C., 2003. Mathematical study of a compressible fluid in a tuyere. *Proceedings of the Copper 2003. The 5th International Conference: Pyrometallurgy of Copper*. Hermann Schwarze Symposium IV, 515–528.
- Sarabia, D., de Prada, C., Cristea, S., Oct. 2007. Hybrid predictive control of a simulated continuous-batch process. *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on*, 1400–1407.
- Schaaf, M., Gómez, Z., Cipriano, A., 2010. Real-time hybrid predictive modeling of the teniente converter. *Journal of Process Control* 20 (1), 3 – 17.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152409002145>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.11.005>
- Sontag E.D., 1981. Nonlinear Regulation: The Piecewise Linear Approach. *IEEE Trans. on Automatics Control* AC-26 (2), 346–349.
- Torrisi F.D. y Bemporad A., Mar. 2004. HYSDEL — A tool for generating computational hybrid models for analysis and synthesis problems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12, 235–249.
URL: <http://control.ee.ethz.ch/index.cgi?page=publications;action=details;id=2223>
- Valencia, A., Rosales-Vera, M., Orellana, C., 2013. Fluid dynamics in a teniente type copper converter model with one and two tuyeres. *Advances in Mechanical Engineering* 5, 902874.
URL: <https://doi.org/10.1155/2013/902874>
DOI: 10.1155/2013/902874
- Valencia A., Rosales M., Paredes R., Leon C., Moyano A., 2006. Numerical and experimental investigation of the fluid dynamics in a Teniente type copper converter. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (3), 302–310.
- Valenzuela A., Palacios J., Cordero D., Sánchez M., 2003. The Chilean Copper Metallurgical Industry: An Update. En F. Kongoli (Ed.). *The Yazawa International Symposium on Metallurgical and Materials Processing Principles and Technologies 2*, 239–252. San Diego, California (USA): The Minerals, Metals & Materials Society.