

JOSÉ LEONARDO BENAVIDES MALDONADO

Universidad Nacional de Loja
jose.benavides@unl.edu.ec

GONZALO RAMIRO RIOFRÍO CRUZ

Universidad Nacional de Loja
gonzalo.riofrio@unl.edu.ec

DIEGO EDUARDO JARA DELGADO

Universidad Nacional de Loja
diego.jara@unl.edu.ec

Recibido: 07/02/2018

Aprobado: 22/06/2018

Resumen

En este artículo se le brinda al estudiante de la Universidad Nacional de Loja, el desarrollo de algunas prácticas de control automático, que son parte del Macrolaboratorio de Formación Conjunta (red de universidades que se unen en este Macrolaboratorio para la enseñanza de control automático), con la finalidad de mejorar la comprensión del proceso de trituración de cobre. Para esto se tomaron datos obtenidos de un prototipo de trituración de cobre, tipo mandíbula, desarrollado en la Universidad Nacional de Loja, y que para su construcción, otros modelos de trituradoras ya existentes. Estos datos que se obtuvieron del prototipo permiten al estudiante hallar un modelo matemático que permita el control del proceso, es decir, de la trituradora, estos datos en un principio fueron sometidos a un tratamiento estadístico adecuado, de manera que se pueda afirmar que el tiempo de muestreo y la conexión de los sensores y actuadores, usados en la adquisición de los datos, son los adecuados, los logros obtenidos sobre la plataforma Moodle. Al aplicar esta práctica, cumplen con los objetivos didácticos y pedagógicos, los que se ve reflejados por los conocimientos y habilidades que se desarrollan en el estudiante. Además que con la ayuda de MATLAB®/Simulink, el estudiante implementa algunas técnicas de control, como son: el clásico PID y el Predictor de Smith. Finalmente se elige la estrategia de control basada en Predictor de Smith, trabajando en tiempo real, es decir, implementando esta estrategia de control, halladas, valorando para esto los siguientes parámetros: máximo pico, tiempo de levantamiento, tiempo de estabilización y error en estado estable.

Palabras clave: MATLAB®, trituración, plataforma Moodle, educación virtual.

TEACHER TOOLS TO TEACH AUTOMATIC CONTROL THROUGH COPPER TRITURATION PRACTICES

Abstract

In this article, the student of the National University of Loja given the development of some automatic control practices, which are part of the Joint Training. Macro-laboratory (a network of universities that join in this Macro-laboratory. For the teaching of mechanical control), with the purpose of improving the understanding of the copper crushing process. For this data taken from a prototype copper crushing, jaw type developed at the National University of Loja, and for its construction, other models of existing crushers. These data, which obtained from the prototype, allow the student find a mathematical model that enables the control of the process, that is. The crusher, these data initially subjected to an adequate statistical treatment, so that it can said that the sampling time and the connection of the sensors and actuators, used in the acquisition of data, are appropriate. The achievements obtained on the Moodle platform, by applying this practice, comply with the educational and pedagogical objectives, which reflected by the knowledge and skills developed in the student. In addition, with the help of MATLAB® / Simulink, the student implements some control techniques, such as the classic PID and the Smith Predictor. Finally, the control strategy based on Smith's Predictor chosen, working in real time, that is, implementing this control strategy, found, evaluating for this the following parameters: maximum peak, Time of rising, Stabilization time and error in state stable.

Keywords: MATLAB®, crushing, Moodle platform, virtual education.

Introducción

La ventaja del uso de estas herramientas, es que en un trabajo práctico el estudiante tiene aproximadamente dos horas para el guion realizado por el profesor. Por otra parte, el laboratorio virtual de la UCLV tiene ocho puestos con capacidad para 24 estudiantes, lo que implica que se tengan que realizar varios grupos de prácticas. El principal beneficio para los estudiantes es la combinación entre las prácticas presenciales y remotas, ya que las horas presenciales permiten conocer y manipular directamente equipos físicos y las horas de trabajo remotas, facilitan el ensayo de diferentes algoritmos, técnicas de control, sin las restricciones que implica un horario presencial.

Es importante que los estudiantes conozcan cómo realizar las conexiones de la maqueta a través de una tarjeta de adquisición de datos por ejemplo, para que en esta se conecten todos los sensores (Santana, I., Ferre, M., Hernández, L., & Aracil, 2010).

El acceso a laboratorios virtuales con conexión en línea permite simular ambientes de aprendizaje, los que se diseñan para ser atractivos y didácticos para quienes los utilizan. Permiten complementar los programas tradicionales de aprendizaje formal, brindando para interactuar con instrumentación industrial a través de una variedad de experiencias de aprendizaje. Adicionalmente, son útiles para ayudar a los estudiantes a reforzar su autoaprendizaje, a pensar creativamente y a entender las complejidades asociadas a la solución de problemas significativos, pero con el apoyo del docente cuyas instrucciones toman amplia relevancia (Aydogmuz, Z., & Aydogmuz, 2009).

Para el desarrollo de prácticas de control automático se debe considerar la alta demanda de estudiantes que acceden a estos laboratorios y el alto costo de los equipamientos que lo conforman, es casi imposible que puedan estar dotados de la cantidad de equipos suficientes, para ser empleados de forma eficiente por todos quienes usan el laboratorio y los equipos solo pueden ser utilizados por un conjunto reducido de estudiantes, que se mencionó anteriormente.

Trituración

Para lograr triturar cierto material se parte de una cantidad promedio que generalmente se encuentra alrededor de 30 000 toneladas diarias en una trituradora del tipo que se elija. Las mismas son depositadas sobre esta y las rocas son fracturadas hasta los 80 milímetros de diámetro. Las bandas transportadoras conducen el material hasta el molino semiautógeno SAG, que es un molino giratorio tipo tambor. El material sale con un máximo de 27 milímetros. En la etapa que sigue, la trituración continúa y las partículas no superan los 0.15 milímetros, el equivalente a una arena fina.

Después se pasa a las celdas de flotación, que es un proceso físico, que usa agua, aire y colectores no contaminantes. Aquí el mineral de cobre forma espuma y se separan de las impurezas. En el espesador, el material se centrifuga y filtra, con brazos y paletas mecánicas que extraen el exceso de agua. Así se obtiene el concentrado de cobre, a continuación en el Gráfico 1, se muestra este ciclo (ECSA, 2010).



Gráfico 1. Se muestran las principales etapas en la trituración de cobre.

Fuente: ECSA, 2010.

Tipos de trituradoras primarias

Algunos de los componentes de una trituradora de cono típico y todo su equipamiento asociado, es decir, de alimentación, cintas transportadoras y pantallas, se pueden encontrar en algunos de los concentradores chilenos y se representa a continuación en el Gráfico 2, donde se ve el esquema de una trituradora con los diferentes factores que afectan al proceso de reducción de tamaño, de un material de flujo a través de la tolva de trituración (Whiten, 1972), (Hatch, 1982).

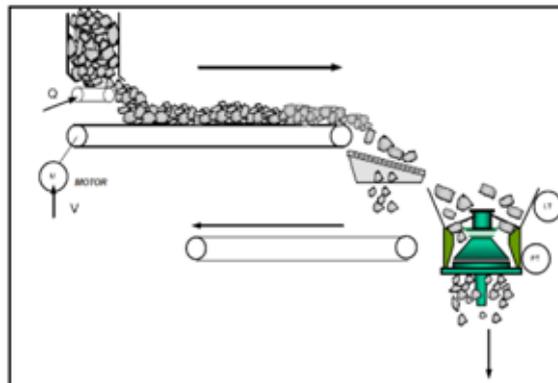


Gráfico 2. Una trituradora cono y sus componentes asociados.

Fuente: Hatch, 1982.

Identificación de modelos de procesos mineros

Dentro de los procedimientos para obtener un modelo matemático que represente a un proceso determinado están: el analítico con datos de entrada-salida y la otra variante es usar Simscape, que es un lenguaje basado en MATLAB® orientado a objetos, simulando sistemas físicos dentro del Simulink, que han sido previamente dibujados por ejemplo en SolidWork.

Si la variante es obtener un modelo haciendo uso de datos de entrada y salida de un proceso determinado, como la práctica que se implementó de trituración de cobre en este trabajo, entonces la siguiente etapa es validar o verificar el modelo obtenido. Para esto no solamente deben ser tomados datos para la estimación y validación del

modelo, en una sola corrida, sino en diferentes pruebas y con diferentes perturbaciones (algo que se da con mucha frecuencia y que afecta la salida). Para validar se debe tener en cuenta, que algunos requisitos son inalcanzables y si se quiere realizar la verificación hay que hacerla con algunos estándares de diseño, los mismos que reafirman el buen funcionamiento del prototipo bajo ciertas condiciones drásticas de diseño (Richard C. Dorf, 2008) también se puede revisar (Ogata, 2010).

Posibilidades que brinda el uso de laboratorios virtuales, usando algoritmos de control

El controlador PID, está presente en los dos procesos del macrolaboratorio de la UNL, este es el algoritmo de control más común hoy en día. En control de procesos, más del 95% de los lazos de control son del tipo PID, aunque de ellos la mayoría son, realmente control PI (O'Dwyer, 2012). También existen herramientas de software como (MATLAB, 2014), que son muy útiles a la hora de calcular los parámetros (proporcional-integral-derivativo), los cuales como dice (Rhinehart, R., Shinsky, F. G., & Wade, 2006), (Blevins, T., & Nixon, 2010), (Åström, K., & Hägglund, 2006), ayudan a limitar el rendimiento de la planta.

Automatización de las bandas transportadoras en la minería

Para el caso cuando el retraso es muy grande por la presencia en el prototipo de bandas transportadoras y que el regulador no funciona, como será mostrado en una de las prácticas que se presenta en esta tesis, que es el predictor de Smith, el cual elimina este problema y es muy utilizado para procesos con retrasos dominantes.

Como es conocido uno de los factores que más afecta la calidad y estabilidad de un sistema de control, ya sea esté basado en PID u otro cualquiera, es la

presencia de retardo puro o retardo por transporte en el canal de control. Muchas soluciones han sido intentadas para compensar el efecto negativo del retardo, destacándose entre otros por su sencillez y efectividad el llamado Predictor de Smith.

El Predictor de Smith en su forma original, supone la modelación del proceso a controlar mediante una función de transferencia de primer orden con retardo, como la de la ecuación (1) (Aguado, 2010).

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{T_s + s} \quad (1)$$

Importancia del problema

La necesidad de un laboratorio virtual de control automático, con datos experimentales obtenidos de prototipos de los procesos de trituración de cobre, y metodologías de trabajo orientadas al entrenamiento de estudiantes de ingeniería y profesionales de empresas de estos sectores hacen necesario el desarrollo de prácticas de laboratorios virtuales y una metodología de trabajo orientada a la enseñanza de técnicas de control automático, en los procesos de trituración de cobre, así, de esta manera se puede contribuir de manera significativa a la formación de especialistas en estas áreas en las universidades y en el sector empresarial. También crearía las bases materiales y metodológicas para la investigación e implementación de nuevos algoritmos y estrategias de control, dirigidas a este sector de la industria.

Metodología

Es así que con la finalidad de mejorar las herramientas del docente para enseñar, se muestra el desarrollo de un sistema para el aprendizaje de las técnicas de control automático sobre la plataforma Moodle, destacándose que cuando se plantean las prácticas del laboratorio relacionadas con la trituradora de co-

bre, así como con la columna de destilación binaria, incluyen la preparación metodológica del profesor, la guía de las prácticas, la información teórica, así como las orientaciones previas de los estudiantes, las cuales se pueden encontrar en anexos. Lo novedoso es el uso de la animación de estos procesos en 3 dimensiones, en SolidWork e importados a MATLAB®/Simulink, con la finalidad de que los docentes de la Universidad Nacional de Loja, tengan una herramienta didáctica que les permita mejorar su pedagogía cuando enseñen control automático relacionado con cada proceso.

Plataforma de acceso al laboratorio virtual

En este apartado se muestra el desarrollo de un sistema para el aprendizaje de técnicas de control automático sobre la plataforma Moodle. Esta implementación consta de tres prácticas de laboratorio relacionadas con la industria minera del cobre, la destilación de petróleo y la robótica. En este artículo se abordarán solamente las dos primeras, por su novedad y la importancia que tienen estos procesos para el desarrollo industrial de Ecuador, pero puede encontrarse una descripción de la última práctica en (Benavides, L & Arias, 2012). Estas prácticas fueron desarrolladas para los estudiantes de las universidades que forman el Macrolaboratorio de Formación Conjunta (M. Fernández; C. Muñoz; E. Rubio & J. Benavides, 2016).

Para acceder a algunas prácticas del Macrolaboratorio de Formación Conjunta (lo conforman tres universidades que son: UCLV, UPV, UBB), por ejemplo el llamado SLD (Sistema de Laboratorios a Distancia) se debe visitar el sitio web: <http://sldubb.ubiobio.cl/>. La unión de las tres universidades citadas anteriormente del Macrolaboratorio, conforma

una red cada vez más sólida de enseñanza virtual y remota en el campo del control automático.

Implementación de la práctica de trituración

Para la implementación de esta práctica se parte del diseño y construcción de un prototipo el cual en la actualidad está en la UNL. A continuación se explica cómo se realizó esto:

Esta práctica se realiza con un prototipo desarrollado en la Universidad Nacional de Loja, procesó de fabricación que se explica más adelante, es decir, no es un proceso simulado como el de la columna de destilación, ya que la maqueta se conecta al estudiante a través de la plataforma virtual.

Diseño y cálculo del prototipo de trituración

Para el diseño del proceso de trituración tipo mandíbula se observó el modelo de fabricación alemana Retsch, como el que se muestra en el Gráfico 3, al cual se le agregó un tambor lateral.

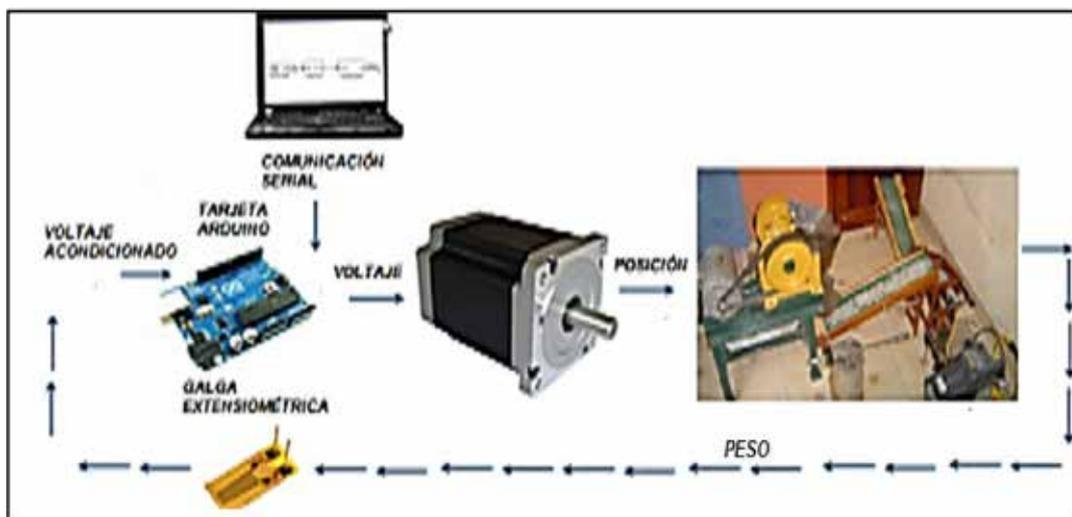


Gráfico 3. Diagrama de bloques del sistema de generación a controlar.

Fuente: Benavides, L., Ochoa, J., Orellana, E., & Salinas, 2014.

Implementación del sistema de control

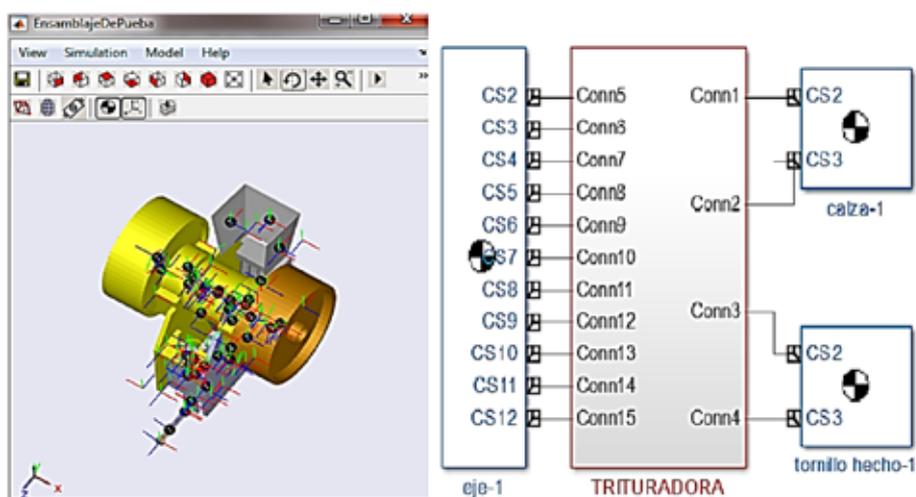
Una vez obtenidos los resultados de las mediciones de los sensores a lazo abierto del proceso se procede a conectar todos estos materiales, de tal manera de cerrar el lazo de control, tal como se ve en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Esquema de la instrumentación utilizada en este trabajo.

Fuente: autores, 2018.

A continuación, en la Gráfica 5 a la izquierda, se muestra una captura de pantalla de la simulación en 3D. En esta imagen los círculos negros representan los puntos críticos, donde se deben colocar sensores o actuadores. Para lograr el control del mismo se implementan los diferentes algoritmos de control que se analizan en la tercera parte. Finalmente, a la derecha de esta imagen se muestra el proceso cuando se dibuja en SolidWork y se importa a MATLAB®/Simulink.



Gráfica 5. Captura de imagen de la trituradora en animación a la izquierda y diagramas de bloques a la derecha.

Fuente: autores, 2018.

Resultados

La Gráfica 5, se muestra la presentación de una de las prácticas de Identificación de Sistemas y que los estudiantes de la UNL pueden apreciar cuando acceden al Macrolaboratorio, la guía de prácticas que se desarrollaron sigue un formato que la UNL exige, se puede apreciar al ingresar en esta dirección web.

Las prácticas de laboratorio que se muestran en este artículo cumplen con los objetivos didácticos y pedagógicos, lo que se ve reflejado por los conocimientos y habilidades que se desarrollan en el estudiante.

La taxonomía basada en prácticas de laboratorio que se muestra en este laboratorio, se fundamenta en los sistemas de conocimiento, los sistemas de habilidades y los medios didácticos.

A continuación, se muestra la Tabla 1 para indicar los parámetros que se han obtenido, cuando al proceso se aplican 4 técnicas diferentes de control, con una entrada escalón y durante 10 segundos de simulación, según esto, el que mejor resultado dio es el Predictor de Smith, señalándose con rojo los parámetros de cada estrategia que no son aceptables y que son motivo para que se descarten esas estrategias.

El máximo sobrepico para el controlador de Smith es el mejor con un 2%, lo que no ocurre con el MPC que claramente demuestra un sobrepico exagerado, aunque mejora apenas en los otros parámetros a controlar.

Tabla 1. Resultados al aplicar diferentes controladores para el lazo de control

	Controlador 1(PID)	Controlador 2 (Predictor de smith)	Controlador 3(MPC) peso posición	Controlador 4(LQR)
Máximo sobrepico	-5%	2 %	2100 % 16 %	
Tiempo de estabilización	17.58 s	37 s	25 s 10s	0 s todos los estados
Tiempo de subida o levantamiento	15 s	25 s	-22 s 4 s	Peso: 22 s, Vel-Ang: 14 s, los demás son despreciables
Error en estado estable	0.2 kg	0,04 kg	0.01 kg 0.01kg	Peso: 0.05 kg, Vel-Ang: 0.01 rad/s, los demás son despreciables

Fuente: autores, 2018.

Discusión

El diseño y construcción de un prototipo a escala de laboratorio de una máquina para triturar cobre con doble tambor, con características únicas, hace que no sea encontrado otro modelo, similar en otras partes, para uso didáctico.

La implementación de un módulo de enseñanza virtual usando plataformas de software libre como Moodle en el laboratorio de automatización de la UNL permite desarrollar herramientas didácticas muy importantes, y que no han sido replicadas, en el campo de la minería de cobre, en otras universidades del Ecuador y de Sudamérica.

Conclusión

El modelo matemático fue de primer orden y fue hallado con la herramienta APPS. Usándose un control clásico en cascada en el sistema, porque da una solución mejor, que el control con un solo regulador, además es más inmune a la perturbación y va tener una respuesta más rápida y más exacta.

En la Tabla 1, se mostraron los resultados al aplicar diferentes tipos de controladores al modelo de la trituradora y el que mejor resultado dio fue el controlador basado en la estrategia Predictor de Smith.

Al usar una señal con diferentes valores de consigna se produce un aumento del tiempo de muestreo y se mejora el tiempo de estabilización del sistema.

Desde el punto de vista estadístico, todo proceso que se analice debe tener un límite de significancia, es decir,

tener un mínimo valor del error para ser aceptado. En el caso de la metodología CADCS, este valor del error está dentro del rango de 2.5% en prototipos y de un 5% en procesos reales, lo cual se corrobora al hallar el modelo matemático del prototipo.

Referencias

- Aguado, A. (2010). *Temas de identificación de control adaptable*. ICIMAF, Ed. Habana, Cuba.
- Åström, K., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. (pp. 85–86). ISA, USA.
- Aydogmuz, Z., & Aydogmuz, O. (2009). A web-based remote access laboratory using SCADA in Education. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(1), 126–132. <http://doi.org/10.1109/TE.2008.921445>
- Benavides, L., Ochoa, J., Orellana, E., & Salinas, E. (2014). *Diseño, automatización y control de un prototipo a escala de laboratorio para trituración de cobre*. (p. 32). Quintana Roo-Cancún-México. Conferencia de Control Automático CLCA 2014. Retrieved from https://controls.papercept.net/conferences/conferences/CLCA14/program/CLCA14_AuthorIndexWeb.html
- Benavides, L & Arias, S. (2012). Implementación de laboratorios virtuales y remotos. *Vinculación con la colectividad*, 2, 38-42. Retrieved from <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/322>
- Blevins, T., & Nixon, M. (2010). *Batch and continuous processes*. ISA, USA.
- ECSA. (2010). *Ecuacorriente*. Retrieved from <http://www.ecuacorriente.com/>
- Hatch, C. a. (1982). *Simulation of the brenda mine ltd*. (M. E. Ed, Ed.). Secondary crushing.
- M. Fernández; C. Muñoz; E. Rubio & J. Benavides. (2016). *Ventana virtual para macrolaboratorio de automatización*. In Universidad de la Frontera (Ed.). Pucón-Chile: XXIX Congreso SOCHEDI 2016, Chileno de Educación para ingeniería UFRO 2016.
- MATLAB. (2014). *Control tutorials*. Retrieved from <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>
- O'Dwyer, A. (2012). *An overview of tuning rules for the PI and PID continuous-time control of time-delayed single-input, single-output*. In E. S.-V. L. Limited. (Ed.) (pp. 3–44). In: PID Control in the Third Millennium - Lessons.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderno*. Pearson Educación, Ed. (Quinta Edición). Madrid, España.
- Rhinehart, R., Shinskey, F. G., & Wade, H. (2006). Control modes - PID variations, instrument engineers. Handbook. *En Process control and optimization*. (P. CRC, Ed.). USA.
- Richard C. Dorf, R. H. (2008). *Sistemas de control moderno*. P. Prentice-Hall., Ed. Décima edición. Madrid-España.
- Santana, I., Ferre, M., Hernández, L., & Aracil, R. (2010). Aplicaciones de sistemas de laboratorio a distancia en asignatura de regulación automática. *RIAI Revista Iberoamericana de au-*

tomática e informática industrial, 7(1), 46–53. <http://doi.org/ISSN:1697-7912>

Whiten, W. (1972). The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 257-264.