

Diseño, Automatización y Control de un prototipo a escala de laboratorio para trituración de cobre.

Autores: Benavides Maldonado José Leonardo, Orellana Edison, Salinas Estefanía & José Ochoa Alfaro

¹Universidad Nacional de Loja, Ecuador, josephle2004@yahoo.es

²Universidad Nacional de Loja, Ecuador, edisillo2005@yahoo.es

³Universidad Nacional de Loja, Ecuador, stefysn@hotmail.com

⁴Universidad Nacional de Loja, Ecuador, ochoaalfaroj@yahoo.es

Resumen: El presente trabajo trata sobre el consumo energético en la minería del cobre. Se ocupa del área de trituración y molienda porque es la que consume el 50% de la energía. Para su estudio contamos con un prototipo diseñado con SolidWork [1] y AutoCad [2]. En el Laboratorio Virtual de la UNL hemos preparado una práctica modelar y controlar este tipo de proceso. Los estudiantes emplean MatLab y Simulink [3] para implementar las soluciones fuera de línea (off line). Para el trabajo en tiempo real emplean LabView [4].

Palabras Clave — AutoCad, CAD, Ident, MatLab, PID (Proporcional, Integral, Derivativo), Predictor de Smith, SolidWorks, UNL (Universidad Nacional de Loja).

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de prototipos a escala de laboratorio, para uso académico o industrial, es así que en este trabajo se muestra, el diseño, construcción y automatización de una trituradora. Esto con la finalidad de simular, como se comporta al aplicarle técnicas de control clásicas.

Para entender mejor el adelanto de estas técnicas, se tomó como modelo de referencia, las trituradoras de marca Retsch, de fabricación alemana que se muestra en la figura 1 y algunos trabajos realizados al respecto [5].



Fig. 1.- El prototipo construido (izquierda), de acuerdo a la (derecha) trituradora marca Retsch de fabricación alemana

Destacando siempre que los procesos de automatización y control han jugado un rol fundamental en las actividades

industriales, ya que reducen de manera significativa los costos operacionales e incrementan la productividad en la actividad minera, al alcance de la automatización y control no solo se aplica a los equipos de manera individual, sino también a sistemas inteligentes, lo que se traduce en ahorro de costos operacionales [13].

En particular, se va a describir mediante un modelo matemático, el comportamiento de un sistema dinámico, como es la trituración, identificando sus parámetros a través de datos experimentales, para realizar esto hay que tomar en cuenta lo siguiente:

Existen dos formas de poder obtener el modelo matemático de un proceso, uno de ellos es partiendo de leyes fundamentales de la Física, dependiendo si el sistema a modelar es Mecánico (ley de Newton $F=ma$), si es Eléctrico (Segunda Ley de Kirchoff), Térmico (Estos sistemas son gobernados por leyes de la termodinámica y transferencia de calor), Si es de nivel se parte (de la ecuación de balance dinámico), si este fuese el caso, es necesario tener un buen dominio de las leyes fundamentales físicas [10].

La segunda posibilidad es utilizar datos experimentales que obligan a emplear el uso de computadoras con software especializados en la identificación de sistemas.

Para esto es importante elegir adecuadamente que software es más adecuado a la hora de aplicar minería de datos, pudiendo ser Weka, LabView o MatLab como en este caso.

Para este caso se debe tomar en cuenta que estos procesos, tienen mucho retardo, el momento de transportar la señal del sensor al PLC o controlador, por lo que se debe tomar en cuenta este retraso o como se lo conoce con sus siglas en inglés (Delay Time).

Una vez modelado el proceso se debe automatizar, para esto vale tener en cuenta qué sensores y actuadores son los que mejores resultados han dado y están dando en este momento en aplicaciones de este tipo.

II MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se estudian y analizan los métodos y herramientas utilizadas en la presente investigación, tales como el diseño del prototipo, tanto para la obtención del modelo matemático, así como la obtención del modelo matemático de la trituradora y el diseño de un controlador, con el uso de MatLab y más específicamente las cajas de herramientas de identificación sistemas, basado en Ident y Simulink.

A. Diseño y Construcción del Prototipo de Trituración.

Para el diseño del primer proceso de trituración tipo mandíbula se observó el modelo de fabricación alemana Retsch, como los que se muestran en la figura 1.

Luego herramientas CAD, como SolidWorks y AutoCad, permitieron obtener algunos resultados de diseño, los que se muestran en la figura 2, donde se puede observar en la parte superior, las gráficas de desplazamiento, tensión y deformación de las placas utilizadas en la trituradora, como también algunos planos realizados en AutoCad, que sirvieron para la construcción de este prototipo.

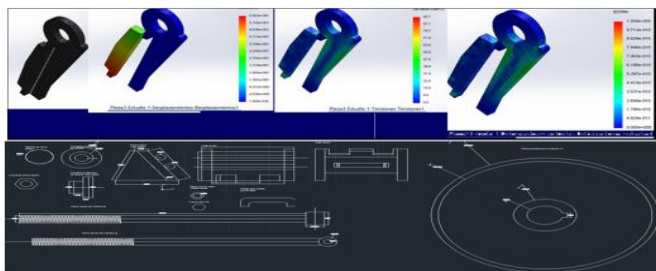


Fig. 2. Gráficas de diseño tanto con Solid

B. Estudio detallado del Proceso

Este proceso ocurre de la siguiente forma: Primero se debe colocar el material en la trituradora primaria (trituradora de mandíbulas) a la que regulamos el diámetro de salida deseado la cual está construida a una escala aproximada de 1:50 de una trituradora real, luego el material chancado cae a una primera banda o cinta transportadora que se encuentra con una inclinación de un ángulo de 30 grados.

Colocada el origen en la salida del material de la trituradora y la parte final sobre la **zaranda** de donde saldrá el material cribado con la malla del diámetro deseado, un porcentaje saldrá cernido y lo que no pasa por la zaranda, por la vibración y la gravedad caerá por un tubo hasta una segunda **banda transportadora** para retorno del material (el cual se va a un molino secundario). Este material que no cumple las especificaciones deseada retornara a la trituradora para lograr el diámetro requerido y trabajará cumpliendo este ciclo. Una relación que ayudará a esto, es el peso de material a la entrada, que debe ser igual al peso de material a la salida.

C. Variables Involucradas en el Proceso

Se debe primeramente definir la variable manipulada o de control y la variable controlada y las posibles perturbaciones, para modelos en los que solo intervienen una sola variable a manipular y controlar (SISO) [11]. Las variables involucradas en este proceso, son las que se muestran en la Tabla 1:

Tabla.1.-Variables del proceso involucradas, su símbolo y unidad como se encuentran para el análisis

MODELO DE LA PLANTA	
Variabes de entrada	Variabes de salida
Torque (τ) [Nt. m]	Peso [Kg]
Perturbaciones	
Relación Velocidad-Carga[m/s-Kg]	
Material que se riega, es 1% del total del material utilizado[Kg]	

Las variables de la tabla 1, están representadas en el modelo de caja negra, cabe señalar que la perturbación es 1% de 2 Kg, que sería 0,02 Kg, ya que este peso es el valor, que se utilizó en las pruebas, esto se muestran en la figura 3.



Fig. 3.-Diagrama de bloques del Proceso de Trituración

D. Diseño y Ejecución de los Experimentos Preliminares para la Identificación del Modelo Matemático

Una vez que se conoce cuáles son las variables de entrada y de salida se considera el torque con el que se controla el perno regulador de la apertura y cierre de las mandíbulas para así obtener el diámetro de material triturado que se requiere a la salida, el peso que será medido con una celda de carga. Se toman 1024 datos ($2^{10} = 1024$) y así poder aplicar la transformada rápida de Fourier en el análisis de la calidad de la señal en el dominio de las frecuencias la forma como se tomaron estas muestras se pueden apreciar en la tabla 2.

Tabla.2.-Forma como se tomaron las muestras.

Días de muestreo (x día)	Tiempo de muestreo(1 muestra/cada 30s)	Nº de Muestras
1 día	1 min	2
1 día	1 hora, si se realizan mediciones durante tres horas diarias	100, en las tres horas diarias de mediciones serian en total 300 muestras realizadas
4 día	12 horas	900
5 día	13 horas y 12 minutos	De esta manera se completan los 1024 datos

En esta etapa se utilizó, para medir el giro de la tuerca un Torquímetro digital¹, cuya unidad es [Nt.m] [12].

Para el peso a la salida se utiliza una celda de carga (la celda mide deformación, su unidad de medida en el sistema internacional es el metro. Pero el sensor, no la celda convierte a Kg la medición). Las celdas de carga son sensores de peso electrónicos cuya finalidad es recibir la excitación eléctrica provocada por un peso determinado aplicado a la plataforma y transmitirlo hacia un indicador de peso en forma de una salida eléctrica.

Todas las celdas de carga mostradas anteriormente funcionan con voltajes de excitación continuos de entre 5 Vdc y 15 Vdc, y proporcionan a la salida unos pocos mili Volts (alrededor de 3 mV) [6].

En la tabla 3, se muestran los diferentes datos hallados experimentalmente y que son necesarios para la identificación del modelo matemático.

Tabla.3.-Datos hallados experimentalmente, para estimar, el modelo matemático.

Angulo sexagesimales	Peso de Entrada(trituradora) Kg.	Peso de salida Zaranda Kg.	Diferencia de peso material (entrada y salida) Kg	Torque T N.m	Longitud de la punta del perno regulador m
0°	2	1,25	0,75	2,706	7 x 10 ⁻⁴
180°	2	1,36	0,64	4,671	8 x 10 ⁻⁴
360°	2	1,42	0,58	5,428	9,3 x 10 ⁻⁴

¹ Torquímetro es un instrumento de precisión, para aplicar, predeterminar o medir, el torque al apretar un tornillo, tuerca u otro tipo, de sujetador que une partes ensambladas, permitiendo, aplicar una fuerza y saber, cuál es su valor, ya que se deben apretar, ciertas, piezas uniformemente, de acuerdo a las especificaciones de cada, proyecto[7].

540° ²	2	1,385	0,615	6,28502	10,2 x 10 ⁻⁴
540°	2	1,52	0,48	6,28502	10,2 x 10 ⁻⁴

Una vez obtenidos los datos se procedió a cargarlos, dividiendo 512 datos para estimar el modelo y 512 para validar el modelo, estos datos deben ser introducidos en forma de vectores, y como un archivo Excel, para que los reconozca MatLab, si esto se ha hecho correctamente deben aparecer en el área de trabajo o workspace de MatLab.

Luego se procede a llamar al toolbox Ident de MatLab, para la Identificación del Modelo Matemático,

Se seleccionó el modelo Box-Jenkins que también se les denomina modelos ARIMA, para ser aplicada este modelo se requiere de una serie temporal de datos que se cuente con un elevado número de observaciones, básicamente consiste en encontrar un modelo matemático que represente el comportamiento de una serie temporal [7].

Para comprender la estructura Box-Jenkins, se debe partir del desarrollo del modelo de error de salida se representa con la ecuación [1], que es para adicionar ruido a la salida

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} \cdot u(t) + e(t) \quad [1]$$

Pero si se escribe esto en el marco de un modelo ARMA, se llega al siguiente resultado

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} \cdot e(t) \quad [2]$$

Siendo esta parametrización de dimensiones finitas más natural si se parte de la ecuación [3a, 3b], esto porque a veces no es posible determinar a priori estos coeficientes partiendo del conocimiento que se conoce de las leyes físicas que gobiernan el comportamiento del sistema, es por eso que la determinación de uno o varios de dichos parámetros debe ser dejada a la estimación, es de Esto quiere decir que los coeficientes en cuestión entran en el modelo como *parámetros a ser determinados*. Llamaremos entonces θ al vector que contenga todos los parámetros a estimar. O sea que ahora la descripción del modelo será la siguiente:

$$y(t, \theta) = G(q, \theta) \cdot u(t) + H(q, \theta) \cdot e(t) \quad [3a]$$

$$f_e(x, \theta), f_{dp} de e(t); \{e(t)\} \text{ ruido blanco} \quad [3b]$$

Ya que las funciones de transferencia G y H son parametrizadas en forma independiente como funciones racionales. Entonces de acuerdo a que se pueden predecir las muestras para cada una de las ecuaciones 36a y 36b, y para enfatizar la dependencia que tiene el estimador con el vector de parámetros θ , la notación se hace de la siguiente manera:

$$\hat{y}(t, \theta) = H^{-1}(q, \theta) \cdot u(t) + [1 - H^{-1}(q, \theta)] \cdot y(t) \quad [4]$$

² El peso del material no siempre aumentara al cerrar el paso del triturado ya que este presenta diferentes características.

Es importante recalcar que la forma de este predictor no depende de $f_e(x, \theta)$, ya que se puede llegar a la ecuación [5] sin hacer estas consideraciones probabilísticas

$$\hat{y}(t, \theta) = \frac{D(q)B(q)}{C(q)F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)-D(q)}{C(q)} \cdot y(t) \quad [5]$$

En la figura 4 se muestra la estructura Box-Jenkins, de la ecuación 1

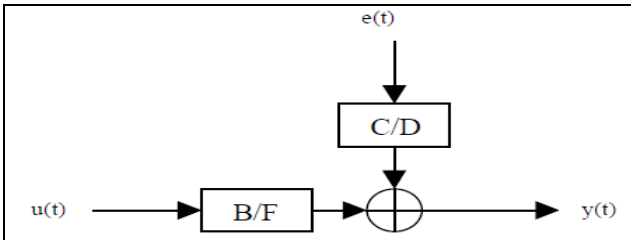


Fig. 4.-Estructura Box-Jenkins, de la ecuación 1, [8].

MatLab, posee algunos comandos como pem, que cubre todos los casos de modelos de caja negra sin embargo existen rutinas más eficientes para algunos casos especiales como son la estrategia BJ [8].

MatLab, también tiene algunas estructuras de modelos entrada-salida: ARX, ARMAX, OE, BJ y ESPACIO DE ESTADO entre otras, para estimar el modelo de la planta con los datos disponibles la mejor estructura fue la de BJ, con el coeficiente nb=7, nc=28, nd=30, nf=4, nk=1 (donde n es el orden del sistema, k el número de retraso del sistema) y las variables b, c, d, f, variables a calcular, con un coeficiente de reproducibilidad del 100% (mejor FIT, estimación del modelo o lo que es lo mismo un 100% del modelo original), esto se puede apreciar en la figura 5.

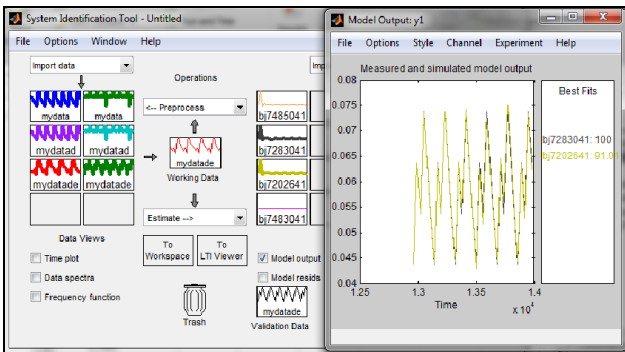


Fig. 5.-A la derecha se muestra el GUI de Ident de MatLab, en donde se ve el tratamiento de los datos, a la izquierda el resultado de estimación y validación del modelo

A continuación se procede a importar al Workspace de MatLab, el modelo encontrado, que es bastante aceptable, el mismo se muestra en la figura 6

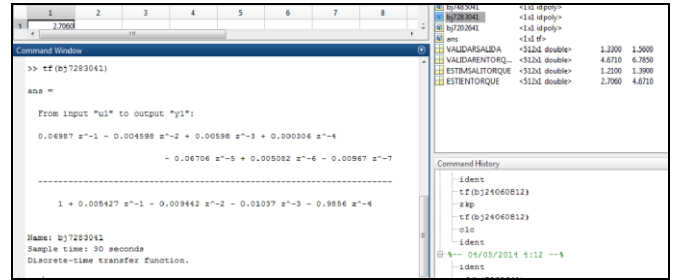


Fig. 6.-Modelo matemático hallado con el toolbox Ident de MatLab

E. Selección de la Estructura del Sistema de Control

Es importante analizar que este es un proceso con un gran retardo de tiempo, por utilizar bandas y cadenas que sirven para el mismo propósito que el tren de engranajes, excepto que permiten la transferencia de energía, sobre una distancia mayor, sin usar un número excesivo de engranajes

En la práctica se pueden encontrar retrasos puros en varios tipos de sistemas, especialmente en sistemas con transmisiones hidráulicas, neumáticas o mecánicas, los sistemas de control por computadora también tienen retardos, ya que en la computadora se toma cierto tiempo en ejecutar operaciones numéricas, en estos sistemas la salida no comienza a responder a la entrada, sino hasta después de un intervalo de tiempo, si la velocidad de la banda transportadora es v (m/s), y d la distancia desde que el material cae de la tolva triturado el tiempo de retardo está dado por la ecuación [6].

$$T_d = \frac{v}{d} (s) \quad [6]$$

Se supone que el peso a la salida de la banda transportadora es $y(t)$ y esta se reproduce sin cambios T_d segundos después en el punto de supervisión, la cantidad medida está dada por la ecuación [7].

$$b(t) = y(t - T_d, \text{ APLICANDO Laplace}) \quad [7]$$

$$B(s) = e^{-T_d s} Y(s) \quad [8]$$

Donde $Y(s)$, es la transformada de Laplace de $y(t)$, la función de transferencia entre $b(y)$ e $y(t)$ [14].

Los actuadores neumáticos convierten la energía del aire comprimido en trabajos mecánicos generando un movimiento lineal mediante servomotores de diafragma o cilindros, o bien un movimiento giratorio con motores neumáticos.

La aplicación principal de los servomotores de diafragmas reside en las válvulas de control neumáticas en las que el servomotor está accionado por la señal neumática de 0,2 – 1 bar (3- 15 psi) y actúa directamente sobre un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo hasta un caudal máximo [9].

En la figura 7 se muestran todos los elementos que son necesarios para el montaje de la propuesta de control y son los siguientes:

- 4 motores (1 motor de ca, bifásico 220/3 hp, 2 motores PAP de 5 Vcc, 1 servomotor).
- 2 bandas transportadoras de 0.85 m y 16° de inclinación
- 1 Cilindro de simple efecto
- 1 Electroválvula 3 vías/2 posiciones 3/2, a 24 Vcc
- Compresor 30 PSI
- Manómetro 120 PSI
- Taquímetro

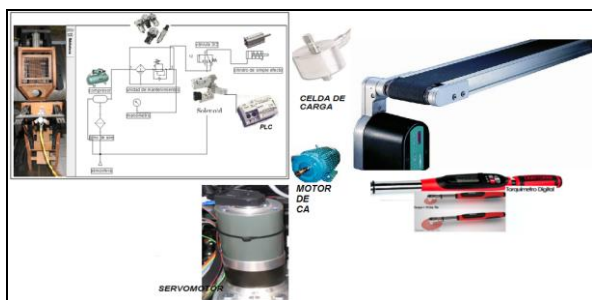


Fig. 7.-Sensores, actuadores y PLC (S7-200 de Siemens), utilizados para automatizar el proceso de trituración.

La estrategia que se muestra se basa en una de las estructuras de control más populares y que trata de solucionar el problema de control de procesos con retraso, el Predictor de Smith, esta se muestra en forma de subsistema que brinda la herramienta de Simulink, en la figura 8.

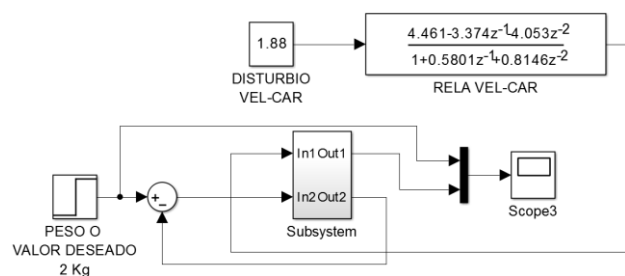


Fig. 8.-Estrategia propuesta basada en Predictor de Smith, en forma de subsistema, con la ayuda de Simulink de MatLab

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la ecuación 10, se muestra el modelo matemático de la trituradora que en este caso es de séptimo orden, esta función nos permite conocer mejor el comportamiento dinámico de la trituradora a esta función de transferencia hallada se la puede reducir por medio de dos métodos la dominancia y la cancelación, tomando siempre en cuenta que lo determina la importancia de un elemento es su proximidad al origen, tomando en cuenta esto y con la ayuda de sisotool de MatLab

se pudo constatar que casi todas las raíces o polos están muy cerca del origen por lo que no es aconsejable hacerlo.

$$D_1 = \frac{0.06987z^{-1} - 0.009442z^{-2} - 0.01037z^{-3} - 0.000306z^{-4} - 0.06706z^{-5} + 0.005082z^{-6} - 0.00967z^{-7}}{1 + 0.005427z^{-1} - 0.009442z^{-2} - 0.01037z^{-3} - 0.9856z^{-4}}$$

[10]

Los parámetros hallados con la ayuda de MatLab, para que el PID, realice el comportamiento de la figura 9, son los siguientes:

- Proporcional (P) : -8,5
- Integral (I) : -6,5e-07
- Derivativo (D) : 65885,01
- Filter Coeficient (N): 9.2e-05

En la figura 9, se muestra la simulación para un tiempo de 300 segundos, en donde con amarillo se muestra el set point o valor deseado de entrada y en magenta el comportamiento de la salida, como se puede ver la salida la sigue a la entrada, hasta montarse sobre ella prácticamente, con un retardo de aproximadamente 30 segundos, como era de esperarse por, el retraso de la distancia de la banda transportadora.

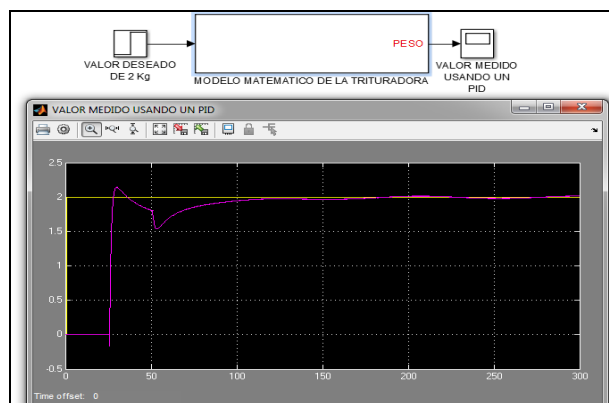


Fig. 9. Se muestra como la señal de salida la sigue a la de entrada, lo que es un claro ejemplo, que el uso del Predictor de Smith, da los resultados deseados.

IV. CONCLUSIONES

1.-Se debe trabajar con acero tratado, para evitar el desgaste de las placas, por el uso de la trituración de diferentes materiales, la trituradora alemana Retsch, en su nueva versión las placas que son en la actualidad de Tungsteno, y de estar completamente horizontal para poder trabajar, ya que posee un sensor de nivel.

2.-Este prototipo, servirá para probar nuevas tecnologías a escala de laboratorio, como además nuevos métodos de diagnóstico, ya que muchas de estas herramientas aún no existen

3.- Estos resultados encontrados permitirán monitorear otros parámetros, con la capacidad de expandirse, ya que si se desea controlarlo, hay que ser capaces de monitorearlos, hay diagnósticos físicos, tecnológicos y de seguridad que dan una idea clara de las cosas que suceden en el interior del proceso,

lo que sería útil para poder hacer realidad esto es sensores de diagnóstico

4.- La señal eléctrica analógica o digital es muy rápida. El retardo está dado por la demora entre el momento en que se mide el tamaño del mineral triturado y el momento en que el accionamiento disminuye o aumenta su acción.

5.- Los accionamientos son subsistemas lentos y la banda transportadora mueve el mineral con determinada velocidad.

ENGLISH SUMMARY

Paper title: Design, Automation and Control of a lab-scale prototype for crushing copper.

Abstract: This paper discusses the energy consumption in copper mining. It deals with the crushing and grinding area because it is consuming 50% of energy. For this study we have designed a prototype with SolidWork [1] and AutoCad [2]. The Virtual Laboratory UNL we have prepared a practical model and control this type of process. Students use MatLab and Simulink [3] to implement the solutions offline (off line). To work in real time employing LabView [4].

Keywords: AutoCad, CAD, Ident, MatLab, PID (Proportional, Integral, Derivative), Smith Predictor, SolidWorks, UNL (Universidad Nacional de Loja).

AGRADECIMIENTOS

A la UNL por permitir ocupar todos los equipos que cuenta el laboratorio de Automatización del Área de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.

REFERENCIAS

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SolidWorks, «SolidWorks,» [En línea]. Available: www.SolidWorks.com.
- [2] AutoCad, «AutoCad,» [En línea]. Available: www.AutoCad.com.
- [3] Mathworks, «Mathworks,» [En línea]. Available: www.Mathworks.com.
- [4] N. Instruments, «National Instruments,» [En línea]. Available: www.ni.com.
- [5] D. Sbarbaro, «Control of Crushing Circuits with Variable Speed Drives,» *IFAC*, 2005.
- [6] D. H. SUAREZ, «MONOGRAFIA CELDAS DE CARGA PARA PLATAFORMA,» 29 JUNIO 2011. [En línea]. Available: https://www.google.com.ec/?gws_rd=cr&ei=TUO_Uri pI8HfkQeay4CYDA#q=seminario+monografia+celdas+de+carga. [Último acceso: 03 04 2014].

- [7] L. Molinero, «Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión,» Enero 2004. [En línea]. Available: <http://www.seh-lelha.org/tseries.htm>. [Último acceso: 17 Mayo 2014].
- [8] C. Kunusch, «Universidad Nacional de la Plata,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/pdf/identificacion.pdf>.
- [9] A. Creus, Neumática e Hidráulica, México D.F. : Alfaomega, 2009.
- [10] «Identificación de Sistemas,» [En línea]. Available: <http://es.scribd.com/doc/67587772/Identificacion-de-Sistemas-para-imprimir>[En línea]: http://www.slideshare.net/MALVAREZHE/ruido15184326?src=related_normal&rel=5825993 [Jueves 05 de diciembre de 2013, 11:20 am].
- [11] A. Aguado, Temas de Identificación de Control Adaptable, La Habana: ICIMAF, 2000.
- [12] *Tuercas, Tornillos y Torquímetros*. [Performance]. Conelak, 2010.
- [13] Latinominería, «Latinominería,» 14 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://www.latinomineria.com/reportajes/equipos-de-molienda-y-chancado-apuntado-la-eficiencia-energetica-y-la-confiabilidad/>. [Último acceso: 15 Mayo 2014].
- [14] UCLM_TEMA3, «MODELADO MATEMÁTICO DE SISTEMAS FÍSICOS,» [En línea]. Available: http://iele.edii.uclm.es/Estudios/ITIE/Albacete/Asignaturas/RA_archivos/A_Descarga/Apuntes/Tema03/Tema03.pdf.