

Uso de CAD para un sistema de identificación de molienda de Cobre

Use of CAD for a copper grinding identification system

José Leonardo Benavides, Edgar Ochoa, Hernán Castillo, Gonzalo Riofrio and Santiago Tocto

Abstract—Ecuador currently proposes a productive matrix based not only on the extraction of oil but also on the exploitation of some minerals. As the mining of copper, a sector with many needs to solve, one of them is the control of weight at the exit of the same. In such a reason in the University National of Loja built a prototype a scale of laboratory for trituration copper, the mathematical model of the same one was identified, employing two methodologies for the identification one based on CADCS (Computer Aided designed and control systems) and the other in Ident (identification system) that owns the MATLAB® software, in order to optimize this process. Next, was presented four algorithms that allowed to control in a simulation the process of crushing and that are: PID, Smith Predictor and then the results of the most relevant parameter was presented in a table. Finally, the best algorithm of control selected it was implemented with the help of Arduino.

Index Terms—CADCS, Identification Systems, Predictor Smith, PID Control

Resumen—Ecuador actualmente propone una matriz productiva basada no solo en la extracción de petróleo sino también en la explotación de algunos minerales. Como la minería del cobre, un sector con muchas necesidades por resolver, uno de ellos es el control de peso a la salida del mismo. Por tal motivo, en la Universidad Nacional de Loja se construyó un prototipo a escala de laboratorio de trituración de cobre, se identificó el modelo matemático del mismo, mediante el empleo de dos metodologías para la identificación, una basada en CADCS (Computer Aided diseñado y sistemas de control) y el otro en Ident (sistema de identificación) que posee el software MATLAB®, para optimizar este proceso. A continuación, se presentaron cuatro algoritmos que permitieron controlar en una simulación el proceso de trituración y que son: PID, Smith Predictor y luego los resultados del parámetro más relevante se presentaron en una tabla. Finalmente, el mejor algoritmo de control seleccionado fue implementado con la ayuda de Arduino.

Palabras Claves—CADCS, Control PID, Identificación de Sistemas, Predictor de Smith

José Benavides pertenece a la Facultad de Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (email: jose.benavides@unl.edu.ec).

Edgar Ochoa pertenece al Departamento de Agua Potable del Municipio de Loja, Loja, Ecuador (email: edgaracho@yahoo.com).

Hernán Castillo pertenece a la Facultad de Geología y Minas de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (email: hernan.castillo@unl.edu.ec).

Gonzalo Riofrio pertenece a la Facultad de Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (email: gonzalo.riofrio@unl.edu.ec).

Santiago Tocto pertenece a la Facultad de la Educación el Arte y la Comunicación de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (email: jorge.s.tocto@unl.edu.ec).

I. INTRODUCCIÓN

EN LA actualidad el Ecuador ha empezado la extracción a gran escala de un valioso mineral como es el cobre, donde la de cielo abierto la más importante, destacándose uno de los mayores yacimientos en la provincia de Zamora. Cuyo proceso de fragmentación usa trituradoras para reducir la roca a un tamaño de 80 milímetros, luego al hacer uso de bandas transportadoras se traslada el material a la molienda que generalmente lo reduce a un tamaño cercano a los 27 milímetros y es artesanal o a pequeña escala, [1]. Estos métodos de trituración y molienda son procesos donde se da el mayor consumo de energía, lo cual conlleva a plantearse las siguientes preguntas:

¿Se puede optimizar la energía en la trituradora de mandíbulas (Jaw Crusher), con el mismo grado de reducción i =tamaño en dependencia de cada empresa, pero que generalmente es 5 veces menor que el tamaño original. ? ; ¿Se puede optimizar la energía en el molino de bolas con el mismo grado de reducción i = tamaño en dependencia de cada empresa, pero que generalmente es 40 veces menor que el tamaño original. ? ; ¿Dónde existen las pérdidas energéticas? ; ¿Cómo establecer modelos matemáticos de este proceso?.

Las interrogantes anteriores son el resultado de una investigación de campo de la problemática que afectan a la minería en la actualidad, y que al ser resueltas, permitirán a los propietarios poder invertir dinero para optimizar este proceso y dejar de comprar nuevos equipos (trituradora), que les resultaría más costoso. Esto debido principalmente porque al controlar el funcionamiento de una trituradora se va a producir un aumento del rendimiento y la eficiencia de la planta [2].

Al tomar en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el objetivo del sistema de automatización que se utiliza en la minería tiene por contexto el de aumentar la eficiencia y la productividad, así como ayudar a apoyar a la operación con información.

Además al comandar la trituradora, cualquiera que fuese el modelo usado, de una forma más eficiente permitirá: 1.) Adaptarse al diseño técnico – económico de circuito cerrado de las plantas; 2) El beneficio económico reflejada a USD/ton procesada y flotada y 3.) El desempeño de circuitos: Conminución-flotación-concentrado, lo que se puede medir por un aumento de producción, mejora de calidad del producto comercial, reducción de costos en las etapas de mayor consumo energético [29]. (e.g., Trituración / Molienda) y por un acrecimiento de la eficiencia en el uso y dosificación de

insumos y reactivos [30].

Estos procesos industriales como por ejemplo: La trituración y molienda son en ocasiones muy difíciles de ser representados a través de modelos dinámicos fenomenológicos o de primeros principios, adecuados para realizar predicción, optimización y control. Por tal razón un enfoque alternativo y fructífero para abordar este problema, consiste en el diseño de modelos basados en datos [3].

Estos datos se pueden obtener a través de un proceso real o un prototipo a escala de laboratorio, como lo expuesto en el presente artículo, lo que permite aplicar diferentes técnicas de control [4]. La importancia de estos prototipos radica en el bajo costo que estos tienen con relación a sistemas reales [5], [6]. El costo es más bajo porque a través de sensores instalados a una DAQ (dispositivo para adquisición de datos), se puede monitorizar el comportamiento del proceso y de esta forma obtener datos que permitan hallar un modelo matemático de la dinámica del mismo [6].

Este artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2, se analiza el estado del arte y caso de estudio de este trabajo. La Sección 3 presenta el modelo matemático del prototipo de trituración, al considerar para esto que en el mundo académico, en la evolución hacia modelos no lineales se puede observar que los modelos lineales y no lineales pueden ser construidos con el conocimiento mecanicista (modelos de caja blanca) o los datos de entrada-salida disponibles (modelos caja negra) [6], [7].

Seguidamente se plantea una comparación entre dos técnicas que posee MATLAB®, a diferencia de lo que se hizo en [6], que solo se emplea una, esto con la finalidad de analizar cuál de estos dos métodos, es el que superiores resultados brinda al modelar un sistema, con los mismos datos de entrada y salida, pero tratados estadísticamente, es decir, (filtrados, escalados e interpolados) [6]. También se pretende justificar la compensación del tiempo muerto, que se ve con mucha frecuencia en la industria, al examinar varias estrategias de control, que ya fueron probadas en [7], pero con un modelo matemático de mayor orden. Finalmente se examinará en este artículo el mejor servomecanismo que permita la implementación de los algoritmos de control estudiados.

II. ESTADO DEL ARTE

Esta sección presenta los conceptos teóricos fundamentales asociados a la propuesta de trabajo.

A. Tipos de trituradoras primarias.

La trituradora que se empleó para obtener los datos para la identificación con las dos estrategias que se presentan en este trabajo es del tipo mandíbula. A diferencia de las trituradoras de cono típico y todo su equipamiento asociado, es decir, de alimentación, cintas transportadoras, pantallas de protección y cribas (cernideros o tamiz), y que se pueden encontrar en algunos de los concentradores chilenos similares a los que se indica en la Fig. 1, 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 [8], [9].

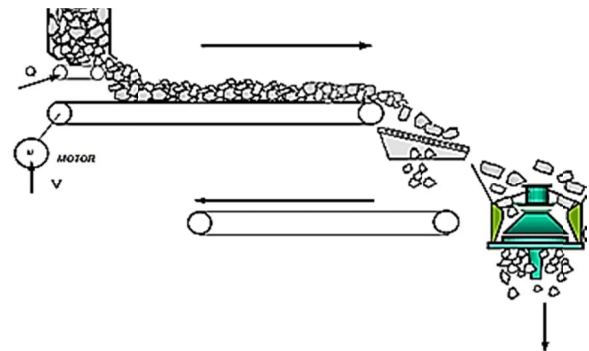


Fig. 1. Una trituradora y sus componentes asociados [8] [9].

Las trituradoras de mandíbulas son máquinas grandes, y resistentes, capaces de aplastar grandes cantidades de materiales duros y abrasivos. Se emplean típicamente como trituradoras primarias dentro de las plantas de procesamiento de agregados. Estas trituradoras son las más comúnmente definidas por tamaño, boca abierta.

Las placas de una trituradora de este tipo se utilizan para aplicar fuerzas de compresión que inducen tensiones de tracción dentro de las partículas, que ocasiona fractura. Las partículas se muerden varias veces hasta que pasan a través de la cámara de trituración. El proceso de rotura se produce entre las placas de las mandíbulas que actúa simultáneamente con un proceso de clasificación. El proceso de clasificación define si o no una partícula se somete a trituración y depende de los ajustes del tamaño de la trituradora y de las partículas, es decir, depende de su granulometría. [10].

B. Controladores.

El esquema de control se seleccionará en función de las respuestas pertenecientes a las variantes de la ley de control PID [15], [16], [28], sintonizadas mediante el método Ziegler – Nichols [15] en lazo cerrado (método de las oscilaciones mantenidas) y en lazo abierto (método de la curva de reacción), así también se tomará en cuenta la sintonización mediante el método Cohen-Coon [15]. De los métodos mencionados anteriormente, se evaluó el de mejores características en relación al tiempo de establecimiento y porcentaje de sobre-oscilación de la variable de respuesta.

C. Servomecanismos.

El servomecanismo Rueda de Ginebra con un valor de 7,3 es la segunda mejor opción después del sistema de engranajes. La diferencia con respecto a este tipo radica en el tiempo de construcción de las ruedas que tienen un nivel más complejo.

El mecanismo rueda de Ginebra se compone de la rueda conductora, en el mismo eje de ésta rueda se acopla el eje del motor paso a paso, mientras que en la rueda conducida se acopla el tornillo ajustable [24]. La rueda conductora dispone de un pivote que al girar hace tope con una de las 4 ranuras que tiene la rueda conducida; en este caso por cada vuelta completa de la rueda conductora, la rueda conducida girará $\frac{1}{4}$ de vuelta o 90° . En este proyecto es necesario que el tornillo

ajustable gire media vuelta, por tanto se requiere que la conductora gire 2 vueltas con lo cual completará 180° en la rueda conducida.

D. Arduino.

Para realizar la adquisición del peso a la salida de la trituradora se empleó una tarjeta Arduino, con las siguientes características. Las tarjetas están basadas en el chip Atmega (versiones Atmega 168, Atmega 328, Atmega 1280) y en la mayoría de los modelos su voltaje de trabajo está en un rango de 7 a 12V DC, aunque también se pueden alimentar con una fuente estabilizada de 5 V DC. La tarjeta ofrece una serie de entradas analógicas en base a 5V digitalizadas mediante un conversor A/D de 10 bits, lo que proporciona una resolución de 4.9 mV con una velocidad máxima de lectura de 1024 muestras por segundo. El intervalo de tiempo T entre dos muestras sucesivas se denomina periodo de muestreo o intervalo de muestreo, y su recíproco se denomina ($1/T = F_s$) velocidad de muestreo, muestras por segundo o frecuencia de muestreo Hz.

En cuanto a las salidas, Arduino ofrece salidas digitales en base a 3.3V o 5V según el modelo de tarjeta y salidas de tipo PWM que generan una onda cuadrada estable, con un determinado ciclo de trabajo especificado por el programador y una frecuencia de 490 Hz [18].

E. Caso de Estudio.

Se valida el uso de esta metodología empleada que parte desde el diseño y construcción del prototipo de trituración que utilizó como modelo una trituradora tipo mandíbula de fabricación alemana marca Retch. Esto se consiguió gracias a la ayuda de dos softwares como son: SolidWork® [13] y AutoCad® [14], obteniéndose así la planta se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Planta trituradora tipo mandíbula, al tomar como base una existente y de marca Retch [6].

También esta metodología hace uso de uso de las CADCS e Ident de MATLAB®, las cuales se emplearon para identificar un modelo que permita determinar el comportamiento del proceso en ciertas situaciones, en las cuales se puede tratar de optimizar el modelo del proceso al cambiar ciertos parámetros con el fin de lograr que se comporte de efectiva manera específica.

Estas dos herramientas la metodología, CADCS (Computer Aided Design for Control System) e Ident son herramientas

que se encuentran en MATLAB® y que permiten encontrar el modelo matemático, de orden nominal reducido, capaz de representar la dinámica del sistema, sin la pretensión de explicar el por qué físico.

El CADCS es el conjunto de herramientas informáticas (software) que permite crear con la ayuda de las computadoras, diferentes diseños de lazos de regulación. Dichas herramientas poseen la flexibilidad con las que el diseñador puede explorar diversas estrategias [11].

Por otro lado, también facilita el desarrollo de métodos de control, para integrarlos luego en el proceso que se desea regular [12].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la identificación se establece que este proceso va ser controlado en cascada, donde el torque no juega un papel importante por ser una variable intermedia y no independiente, lo que sí existe es una relación linealmente proporcional entre el torque y la posición.

Una vez que se conoce cuáles son las variables de entrada y salida se usa para la experimentación dos tipos de señales una tipo escalón y una señal binaria pseudoaleatoria (SBSA). Donde se considera el perno regulador de la apertura y cierre de las mandíbulas la variable que representa la posición expresada en radianes, para así obtener el volumen de material triturado que se requiere a la salida, este material que es el peso será medido con una celda de carga. Para esto se tomaron 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.

En la Fig. 3 se muestra una foto de la trituradora en la que se indican las señales de entrada, salida y las dos perturbaciones.

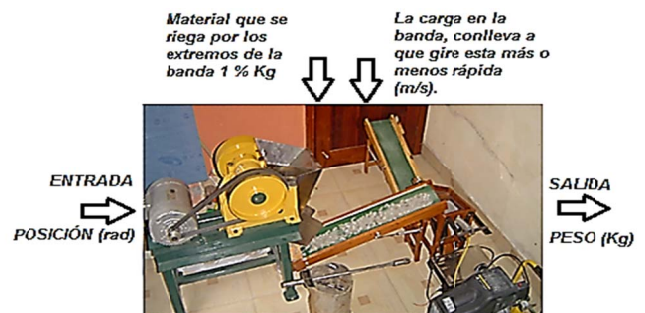


Fig. 3. Foto de la trituradora en la que se indican las señales de entrada, salida y las perturbaciones.

Seguidamente se parte de un modelo de caja negra, de una sola entrada, una sola salida y dos perturbaciones como se muestran en la Tabla I, con el objetivo de demostrar la calidad de los datos adquiridos y pasar a identificar un modelo matemático del sistema mediante el método de Strejc para valorar el retardo, el mismo sirve para identificar modelos lineales y continuos del tipo de la ecuación (1):

$$G(s) \cdot \frac{K}{(T_s + 1)} \cdot e^{(\tau_s)} \quad (1)$$

TABLA I
VARIABLES INVOLUCRADAS EN ESTE PROCESO

Modelo de la planta	
Variables de entrada Posición (rad)	Variables de salida Peso (kg)
Perturbaciones	
Relación Velocidad-Carga (m/s/kg)	
Material que se riega, es 1% del total del material utilizado (kg)	

A. Diseño y ejecución de los experimentos.

Los experimentos preliminares se realizan con el fin de caracterizar las variables del sistema y obtener información del proceso tales como: la ganancia del sistema, el retardo, el posible orden y la menor constante de tiempo, donde toda esta información es necesaria para el diseño apropiado del experimento de identificación. El modelo que se obtenga va a ser utilizado para el control, por lo que la señal de entrada debe tener un valor lo más cercano posible al estado de operación [17]. Lográndose con esto que el prototipo a escala laboratorio permita simular el proceso de trituración de una forma muy segura.

Finalmente se conectan todos los elementos tal como se ve en la Fig. 4, el experimento se realiza en lazo abierto. Las mediciones obtenidas se obtienen al cerrar manualmente un torquímetro analógico con una tuerca. Que a su vez permite el cierre de las placas de la trituradora en 4 posiciones (0 rad, π rad, $3\pi/2$ rad, 2π rad), siempre con el objetivo de obtener una mejor trituración del material.

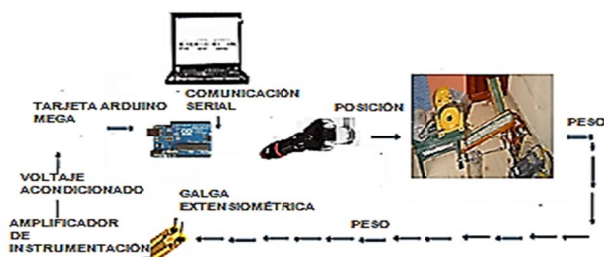


Fig. 4. Esquema de la instrumentación empleada en este trabajo.

B. Sistema de calidad y datos requeridos.

Después de la recolección de datos siempre es necesario hacer un análisis estadístico de las mediciones obtenidas, además el análisis gráfico de las curvas de respuesta del tiempo y frecuencia. Esto permite determinar las relaciones entre las señales de entrada y salida de manera cuantitativa y examinar la calidad de las mediciones, el comportamiento de las variables y comprobar la presencia de ruido y retardos [19].

En caso de no poseer un Data-Logger, el software MATLAB[®] es la herramienta que permite agrupar y realizar el análisis de todas estas mediciones, esto es, el análisis gráfico, el análisis estadístico y el análisis de señales en el dominio de las frecuencias, así que ésta es la herramienta básica para los CADCS. Para este caso, se procede a cargar los datos previamente distribuidos.

Al iniciar por la señal analógica del proceso, que es el peso

fue muestreada con una tarjeta Arduino, sin embargo se debe tener en cuenta que las limitantes de cualquier tipo de tarjeta de adquisición de datos DAQ, es que llegan solo hasta un valor determinado de tiempo de muestreo de 0,00098 segundos. En este caso fue suficiente la cantidad de muestras que se obtienen con la tarjeta Arduino.

De igual forma se obtuvieron al excitar el proceso de trituración con un paso escalón los datos de la Tabla II y de esta manera determinar el período de muestreo correcto, para realizar los experimentos de identificación. Cabe señalar que los datos que se obtuvieron fueron en lazo abierto.

Físicamente esta señal de paso se logra con el uso de un contacto normalmente abierto en la tarjeta de Arduino, que al accionarlo se obtiene un 0 y un 1 lógico. A los que les corresponde un mínimo y máximo de tensión respectivamente [20].

TABLA II
MUESTRA DE LOS VALORES MÁS SIGNIFICATIVOS DE LOS RESULTADOS HALLADOS EXPERIMENTALMENTE DE LA TRITURADORA

Ángulo (rad)	Voltaje de salida (V)	Peso entrada (kg)	Peso salida (kg)	Torque (Nm)
0	0	2	1.25	2.706
π	9.81	2	1.36	4.671
2π	10.2	2	1.42	5.428
3π	10.1	2	1.385	6.28502
3π (Piedra de Río)	9.7	2	1.52	6.28502

Consecutivamente en la Fig. 5 se puede apreciar la respuesta ante una señal de entrada paso escalón, o lo que se conoce en inglés como (step-test), cuyo valor para los experimentos realizados es uno y que está representado con un color azul, así mismo la respuesta a esta entrada se puede apreciar con un color marrón.

En cada una de las mediciones realizadas o para cada posición se han realizado 256 experimentos, con su respectivo retraso en el tiempo, esto permite hacer uso de solamente una parte de los 1024 datos para la identificación, y así lograr simplificar notablemente el orden de la función de transferencia obtenida en [6]. También en la Fig. 5 se puede apreciar debido al transporte de material en una banda a la salida de la trituradora y cuyo valor es de 17.58 segundos. En cada experimento se puede apreciar el incremento en la salida, porque la galga extensiométrica empieza a recibir un mayor peso que cae de la banda transportadora. La amplitud de esta señal de consigna o entrada es de 2 kg (paso de 0 kg a 2 kg).

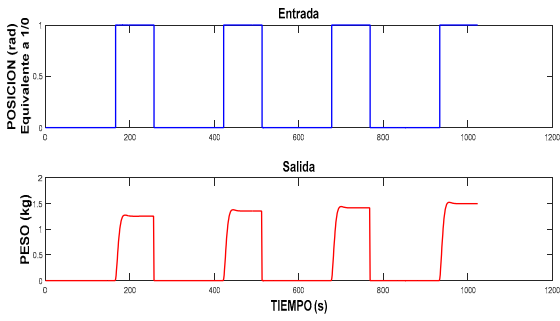


Fig. 5. Representación de los datos obtenidos en cada una de las posiciones que se emplearon para mejorar la trituration del material.

C. Diseño de los experimentos de identificación.

Una vez definido el tiempo total que dura cada experimento y que es de 17.58 segundos incluido el retardo en el tiempo de la banda transportadora, se procede con la ayuda del MATLAB® a realizar el análisis en el dominio del tiempo para saber si los datos obtenidos, fueron alcanzados con un correcto tiempo de muestreo, además de ratificar la presencia de retardo.

Además se comprueba si existe autocorrelación (es la dependencia lineal de una variable consigo misma en dos puntos en el tiempo). Para procesos estacionarios, la autocorrelación entre cualquiera de las dos observaciones solo depende del intervalo de tiempo h entre ellas, para esto es necesario calcular primero la covarianza mediante (2):

$$Cov(y_t, y_{t-h}) = \gamma_h \quad (2)$$

El retraso h de la auto correlación está dada por (3):

$$ph = Corr(y_t, y_{t-h}) = \frac{\gamma_h}{\gamma_0} \quad (3)$$

Donde la función de autocorrelación para una serie de tiempo, cuyos valores de $t = 1 \dots N - 1$, y el denominador es la covarianza de retraso. A continuación, se describe la manera como se empleó la función autocorr con el asistente matemático de MATLAB® [19], [21]. Obteniéndose así esta función: autocorr (PESO2), cuyo intervalo de muestreo definido se puede apreciar, también es posible recoger la información necesaria del proceso para estudiar su comportamiento dinámico con la función, [acf lags]= autocorr (PESO2)

Donde PESO2 es la salida de la trituradora, acf es el vector que contiene las muestras de auto-correlación y lags, es el vector que contiene los retardos. Por defecto MATLAB® establece que son 20 pasos de retardo, pero esta cifra puede modificarse, en el programa, desarrollado [19], [23].

El peridiograma, esto es, la transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia. MATLAB® posee la función FFT, o los coeficientes de Fourier pero escalados en M . Esta transformada de Fourier es una idealización, para acercarse a ella se debería utilizar un periodo de muestreo que tiende a cero y el orden del algoritmo FFT, debería tender a infinito de manera que se abarquen todas las muestras de la señal. La autocorrelación lo que permite es conocer si el tiempo de

muestreo seleccionado es el correcto y la correlación cruzada si existe un retardo en el tiempo en el proceso. A continuación se explica lo anterior a través de algunas expresiones matemáticas.

$X(f, T)$ es la transformada de Fourier. La señal X_T es observada en una ventana de tiempo t , es decir, $X(f, T)$ es la transformada de Fourier de la versión truncada de una señal X_T ; y la densidad espectral de potencia es esa transformada de Fourier, de la señal truncada en el tiempo de una magnitud elevada al cuadrado promediada en el tiempo, lo que se puede ver en la siguiente expresión:

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |X(f, T)|^2 \quad (4)$$

Y esta expresión es la que se llama periodograma, es decir, en si un periodograma se acerca a la densidad espectral en la medida en que T tienda a infinito, lo que se ve en el miembro de la derecha en (5):

$$|X(f, T)|^2 \quad (5)$$

El resultado de aplicar lo anterior se puede apreciar en la Fig. 6 [1].

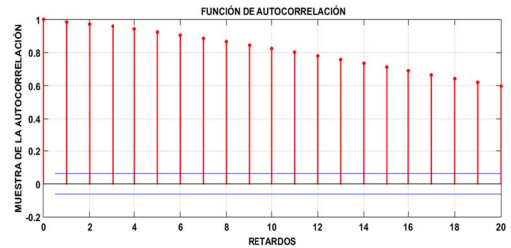


Fig. 6. Correlación cruzada de la entrada (posición) con respecto a la salida (peso).

Para continuar con el análisis se debe definir el tiempo de muestreo, que para este trabajo es de 0.001024 segundos con una resolución de 2^{10} bits, lo que es igual a 1024 datos que se obtienen en un 1 segundo, es decir, que si se la simulación tuvo una duración de 16.9 segundos, hasta obtener una gráfica que se estabilizó. Se obtuvieron alrededor de 17.306 datos.

Seguidamente se realizó un proceso de interpolación de los 17.306 datos, para de esta forma obtener una cantidad suficiente de información del comportamiento del proceso, hasta su procesamiento posterior [22]. Se interpoló a 1/10 de T_s y además se renombraron las variables como: PESO2 al peso del material triturado y POSI a la posición de cierre de las placas del modelo de trituradora tipo mandíbula.

Al simular estos resultados se obtuvieron, para un valor de retrasos de 400, que afirma que 16.9 es el valor correcto de retraso.

La correlación más fuerte se encuentra en el instante 16.9 (Lag) con un valor de 0.216 que son las muestras de correlación, representada en el eje de las y . Se conoce que $T_s = 1/10$ seg por lo que el retardo (τ) se puede calcular como se indica en la ecuación (6).

$$\tau = T_s \cdot Lag \quad (6)$$

De la ecuación anterior se extrae que el proceso tiene retardo y que es de 16.9 y está formado por la suma de la trituración más el tiempo que se demora el material en recorrer la banda transportadora hasta que se logra medir, que es justamente el valor empleado en los experimentos.

Con los resultados obtenidos anteriormente se puede afirmar que tanto el tiempo de muestreo, así como el retardo que se muestra en el ejemplo es el adecuado. Inmediatamente se procede a estimar el modelo matemático de la trituradora, mediante el uso de la herramienta CADCS, que es un asistente de computadora para el diseño de sistemas de control, basados principalmente en cálculos estadísticos básicos que se detallan a continuación.

D. Uso de la herramienta CADCS para la identificación.

Una vez que se realizó el análisis en el dominio del tiempo se procede a identificar el modelo matemático de la trituradora, para lograr esto se empieza por cargar las variables de entrada y salida obtenidas experimentalmente, en el workspace de MATLAB®. Al considerar que cada experimento genero 1024 datos en un segundo, y que además concuerdan para poder aplicar el criterio de los datos de Fourier 2ⁿ, o para este caso 2¹⁰, justificándose así que se relacionaron 256 datos para cada posición (0 rad, π rad, 3π/2 rad, 2π rad).

E. Aplicación de la función escalamiento para reducir el error.

Luego de tratamiento estadístico apropiado a los datos usados con la finalidad de reducir el error se hace uso de los siguientes comandos:

p= polyfit (X, Y, 3), esta función entrega los coeficientes de un polinomio p(x) de grado n, a través del ajuste por el método de mínimos cuadrados para los datos en Y, donde X es la salida del Peso, la Y es la entrada o Posición y n viene hacer el grado del polinomio con el que se realiza el ajuste, denotadas por X, Y ya que así se definió a los datos de entrada y salida, esto significa que lo que se halla es la correlación cruzada de la entrada (posición) con respecto a la salida (peso).

Dataprev, esta función permite visualizar los datos de entrada y salida empleados, además de poder apreciar notablemente la auto-correlación de la entrada y de la salida, así como la correlación entre la entrada y la salida.

Finalmente al ser uso de la función: [Num,Den,Fit,atm]=idstrejc (t, PESO2, np, stp); para los datos obtenidos experimentalmente se obtiene la Fig. 7.

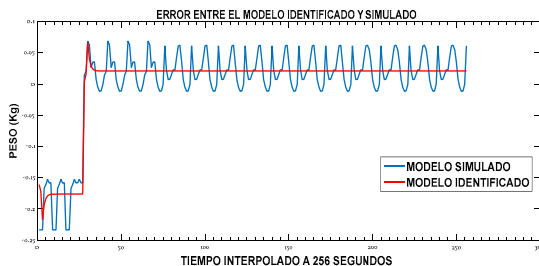


Fig. 7. Error hallado entre los datos medidos y los simulados.

F. Verificación del modelo matemático mediante el uso la herramienta APPS (aplicaciones de MATLAB®).

Con la ayuda del toolbox ident de MATLAB®, se procede a cargar los datos hallados experimentalmente, para poder usar las herramientas de optimización. De manera que al enviar los datos al optimizador de sistemas de identificación se minimiza el error entre las señales identificadas, lo que se conoce como fit y los datos, es decir, con estos datos experimentales lo que la herramienta hace es un ajuste de un modelo por defecto.

Para lograr el mejor ajuste se procede a estimar de acuerdo a la experiencia del que usa esta herramienta, la dinámica de la planta, donde que para que sea confiable la planta estimada debe ser superior al 86% de reproductibilidad.

A continuación, con esta herramienta se obtiene los resultados que se muestran en la Fig. 8, en la parte de la izquierda y con azul la forma de la planta que se va usar para aplicar las distintas estrategias de control.

Esto permite hallar el modelo matemático deseado mediante el PEM (prediction-error minimization) por sus siglas en inglés. El FIT (ajuste a la estimación de datos) dio el 95.63% y el FPE (fit prediction-error) por sus siglas en inglés arrojó un valor de 0.00047335, que empleo una estructura basada en una función de transferencia de primer orden con retardo. Al considerar que un sistema con tiempo muerto siempre ha de presentar una frecuencia de fase ante un estudio espectral o bode y mediante el uso del valor de tiempo muerto muy superior a cualquier constante de tiempo del sistema, se toma el modelo de orden nominal reducido con el fin de facilitar sintonización de los parámetros del controlador.

Posteriormente en la Tabla III se presentan los resultados hallados a través del software MATLAB® y diferentes tipos de acondicionamiento a los datos hallados experimentalmente. La metodología CADCS está presente en esta tabla en la columna 2; aquí se puede apreciar que el error es muy grande ante la presencia de retardo y al cual aplicar una señal de entrada escalón, como es el caso de este proceso. Descartándose finalmente esta metodología al aplicar algunas técnicas a los datos experimentales, ya que se puede apreciar que se logra corregir el error pero no al valor de un prototipo del proceso que es del 2.5% y del 5% para procesos reales [12].

En la tercera columna, de la Tabla III, la herramienta APPS, logran minimizar el error de una forma considerable a un valor de 0.00047335, que está dentro del rango permitido para prototipos.

Por tanto, con la información obtenida anteriormente y al considerar que la salida será estable para la entrada de 2kg. Se puede ratificar que la salida después de un tiempo constante de 5,538 es de 63,2% x 2kg, o lo que es lo mismo 1,264 kg. Entonces el modelo matemático de la trituradora será el de la ecuación (7), en tiempo continuo tal como da la herramienta ident.

$$TF = \frac{PESO(s)}{POSICIÓN(rad)} = \frac{1.2725}{5.538 \cdot s + 1} \cdot e^{-17.58 \cdot s} \quad (7)$$

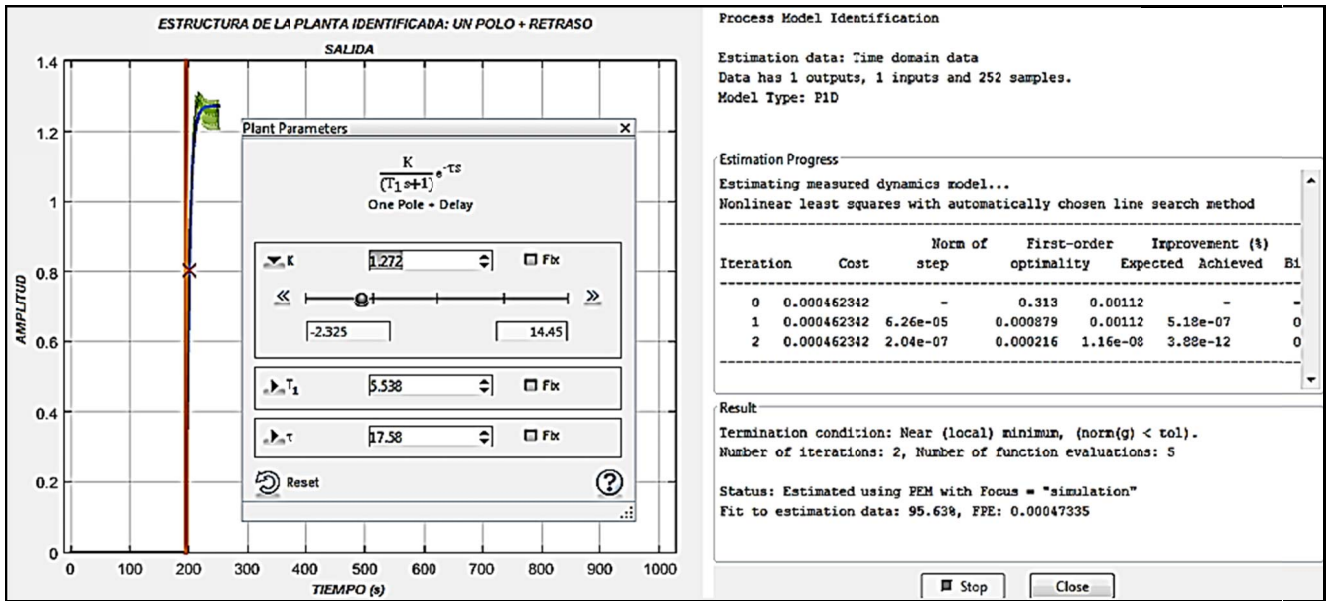


Fig. 8. Resultados obtenidos con la herramienta APPS de MATLAB®.

TABLA III
MUESTRA DE LOS VALORES MÁS SIGNIFICATIVOS DE LOS RESULTADOS HALLADOS EXPERIMENTALMENTE DE LA TRITURADORA

	CADCS-Datos Interpolados, filtrados y escalados(1024)	Al aplicar la herramienta APPS de MATLAB®
% del Error	Al inicio de la simulación es de 100%, a la mitad de 10% y al final de 0%	0.00047335
Modelo Matemático Obtenido	$TF = \frac{1.017}{0.0001 \cdot s + 1}$	$TF = \frac{1.2725}{5.538 \cdot s + 1} e^{-17.58s}$

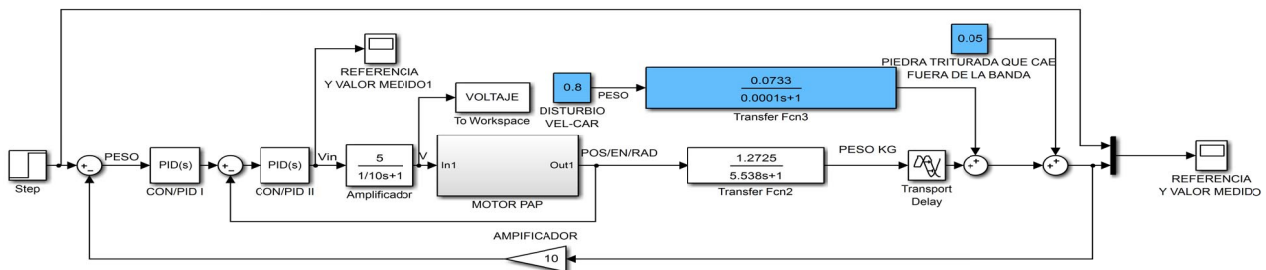


Fig. 9. Esquema de control en cascada, planteado para la trituradora.

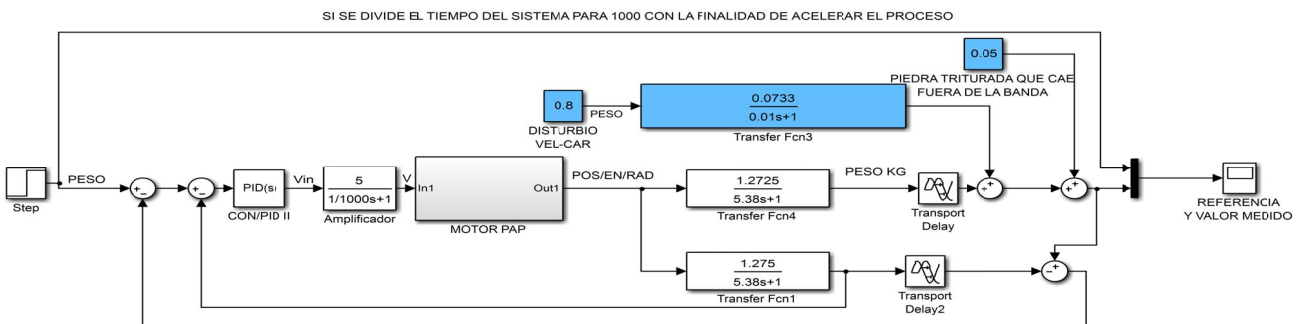


Fig. 10. Diagrama de bloques mediante el método de control Predictor de Smith.

G. Diseño del servomecanismo

De acuerdo al valor final obtenido la mejor opción es utilizar el sistema de engranajes con un puntaje de 8.6, lo cual se corresponde con las condiciones de la máquina. El sistema de engranajes no requiere de mucho espacio, así también su construcción es más rápida con referencia a los otros sistemas, tiene muy buena eficiencia y se prolonga su vida útil con un adecuado mantenimiento que es la lubricación de los dientes. Debido al valor obtenido se selecciona para esta servotransmisión el sistema de engranajes. Lo cual permitió proceder a diseñar las dimensiones de las ruedas dentadas que componen el engranaje [2].

Para el cálculo del número de dientes de la rueda conductora (engranaje), se debe cumplir con la ecuación (8)

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (8)$$

Donde i es la relación de transmisión, Z_1 es el número de dientes de la rueda conductora, Z_2 es el número de dientes de la rueda conducida, n_1 son las revoluciones por minuto de la rueda conductora, n_2 son las revoluciones por minuto de la rueda conducida.

También se debe estimar el tornillo ajustable necesita girar media vuelta, para lo cual en el mismo eje del tornillo se montará la rueda conducida (piñón) que se diseña con 10 dientes, mientras que la rueda conductora en consecuencia se diseña con 1 vuelta y al aplicar la ecuación (8) se tiene $i = 0.5$.

De tal forma queda $Z_2 = 20$ dientes. Adicionalmente para la construcción de las ruedas es necesario definir el módulo de $m = 3.5$. El valor de m se fija mediante el cálculo de resistencia de materiales, en virtud de la potencia transmitida y en función de la relación de transmisión que se establezca [25].

De esta con los valores adoptados se procede a modelar el mecanismo rueda de ginebra, mediante el uso de un programa de diseño SolidWorks® y para el modelo del motor se realizó una simulación en MATLAB®/Simulink, el cual se representa por dos ecuaciones diferenciales: (9) y (10), respectivamente [26], y que representan la dinámica de un motor de cd, a partir de las leyes físicas eléctricas y mecánicas del motor.

$$V = K \cdot \omega + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (9)$$

$$T = K \cdot i + b \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

Seguidamente se explica la nomenclatura de la parte eléctrica y mecánica de un motor de cc y que se emplea en (5) y (6), para luego ser llevadas a MATLAB®/Simulink, V el voltaje de alimentación del motor, T el torque que se desea conocer, R la resistencia óhmica de los embobinados del rotor, L la inductancia de los embobinados del rotor, J el momento de inercia del rotor y de la carga reflejada hacía el, que hace contacto con la rueda conductora del mecanismo rueda de Ginebra, b el coeficiente de fricción viscosa entre el rotor y los cojinetes del motor; K es una constante que relaciona la parte

eléctrica y la mecánica y se encuentran en el torque y en la fuerza electromotriz inducida respectivamente.

Destacandose que existen otras variables que dependen del tiempo la velocidad angular del rotor y la corriente del sistema

El retardo del tiempo es de 17.58 segundos, porque en todo proceso en el que se presentan bandas transportadoras, poseen un tiempo desde que el material cae en la banda hasta que es finalmente medido este valor.

IV. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Estos controladores son muy usados en la industria por su fácil implementación, además de venir como un bloque de programación en los PLC, son físicamente equipos que permiten ajustar las ganancias K_p , K_i , K_d (ganancia Proporcional, Integral y Derivativa correspondientemente), estos parámetros y su obtención fueron hallados con la herramienta computacional MATLAB® y se los muestra en la Tabla IV y Tabla V, respectivamente.

TABLA IV
AJUSTES DEL REGULADOR BASADO EN PID

	K_p	K_i	K_d	Coef. Filtro
Ganancia PID, principal	0.034	0.002	0.189	0.036
Ganancia PID, secundario	0	4.366e-05	0	100
Tipo	Paralelo	Paralelo	Paralelo	Paralelo
Tiempo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo

TABLA V
AJUSTES DEL REGULADOR BASADO EN PREDICTOR DE SMITH
AJUSTES DEL REGULADOR BASADO EN PREDICTOR DE SMITH

	K_p	K_i	K_d	Coef. Filtro
Ganancia PID	3.893	0.003	5.609	13247.634
Tipo	Paralelo	Paralelo	Paralelo	Paralelo
Tiempo	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo

A continuación, se muestra en la Fig. 9, el uso de este tipo de controlador al proponer un control en cascada para el proceso de trituración. Dicho control consta de un motor PAP (motor paso a paso) y un modelo de la trituradora donde la entrada es la posición del motor PAP, ambos reguladores son PID, y los periodos de control no son los mismos, el del motor es 10 veces menor, que el periodo de control de la variable principal que es el peso.

En la Fig. 10, se plantea un tipo de control basado en el controlador con Predictor de Smith, que es muy usado para sistemas con gran presencia de retardo, que vendría hacer una variante del que se mostró en la Fig. 9. Es importante resaltar que todos los algoritmos emplearon una señal de entrada escalón.

En la Tabla VI se muestra el resultado de aplicar dos controladores diferentes al modelo de la trituradora y el que mejor resultado dio fue el controlador basado en Predictor de Smith, es decir, se analizó la respuesta de estos 2 controladores.

TABLA VI
RESULTADOS DE APLICAR DIFERENTES CONTROLADORES PARA EL LAZO DE CONTROL

	Controlador 1 (PID)	Controlador 2 (Predictor de Smith)
Máximo sobre impulso positivo y negativo	-5%	10 %
Tiempo de estabilización	65 s	19.42 s
Tiempo de subida o levantamiento	15 s	5 s
Error en estado estable	0.2 kg	0,04 kg

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Implementación del sistema de control.

Una vez obtenidos los resultados de las estrategias de control aplicadas al proceso se procede a conectar todos estos materiales tal como se ve en la Fig. 11.

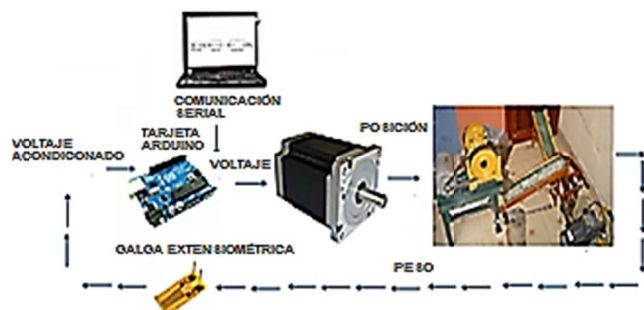


Fig. 11. Esquema de la instrumentación utilizada en este trabajo.

En la Fig. 12 se muestra el resultado del control implementado, cuando la señal de referencia es de 2 kg y se representa en esta grafica con color azul, es seguida por la respuesta del sistema que es el peso a la salida de la trituradora y que está con color rojo.

Existe un sobre impulso en la respuesta que es característico de estos procesos donde se trabaja con arranque de motores y la presencia de corrientes superiores a la nominal del motor, por ejemplo esto puede ser controlado con el uso de bloques anti-windup (reinicio del reajuste) que tiene que ver con limitar la salida y entrar en los límites de saturación de la planta, lo que daría muy buenos resultados si además se combinarán con arrancadores suaves o variadores de frecuencia, pero esto no se corrigió en este trabajo por no ser parte de los objetivos del mismo. También se puede apreciar el retardo en el tiempo y cuyo valor es de 17.58 segundos, esto debido principalmente a la traslación de material en la banda transportadora.

Posteriormente, se hizo el control con una señal de referencia tipo secuencia de valores. Al aumentar el tiempo de muestreo se puede apreciar mejor el control basado en el Predictor de Smith.

En la Fig. 13 se puede observar la primera parte de este control, que tuvo una duración de 210 segundos, para esto se aumentó el tiempo de muestreo y se disminuyó el tiempo de respuesta de la función de transferencia como el retardo del sistema.

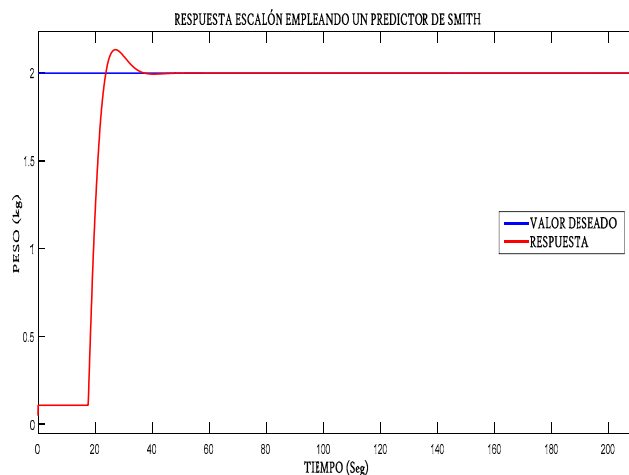


Fig. 12. Primera parte del control basado en Predictor de Smith.

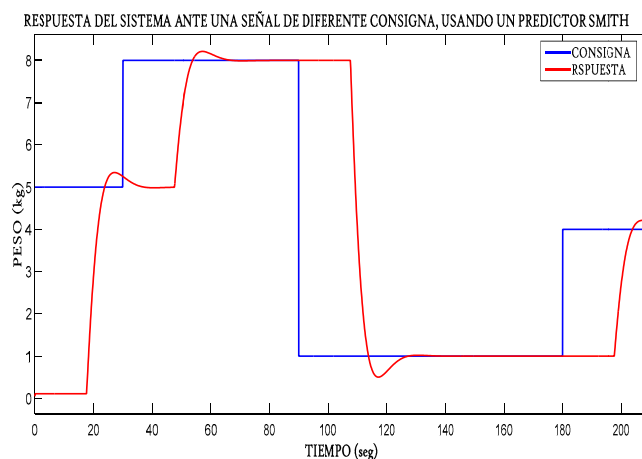


Fig. 13. Respuesta ante diferentes valores de consigna.

Para la conminución de minerales (Trituración y/o Molienda), es importante contar con toda la información necesaria para realizar los balances de materiales en cada punto del proceso. Esto es importante, ya que es una manera indirecta de verificar que los equipos, habitualmente enlazados entre sí por un sofisticado sistema de automatización y control, se encuentren en operación dentro de los márgenes de lo diseñado y poder detectar cualquier variación en algunos de los parámetros operacionales habituales [28].

En trituración, el control y optimización de la granulometría de alimentación y la descarga (razón o grado de reducción; $i = 4-6$ en T. primarias); así como el consumo energético ≈ 0.25 Kwh/Ton, son de vital importancia para determinar, de una manera rápida, cuál es la fuente que ocasiona el problema y resolverlo.

VI. CONCLUSIONES

El modelo matemático es descriptivo al ser el producto de estudios analíticos y de experimentación, además es de primer orden y fue hallado con la herramienta APPS. Usándose un clásico control 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. También se determinó que el mejor controlador para esta aplicación es el Predictor de Smith.

Con respecto a la eficiencia estará dada por un correcto ajuste del controlador a partir de los índices o criterios de desempeño a utilizar y que son los siguientes: La integral del error absoluto (IAE), tiempo de asentamiento al 2% ($t_{a2\%}$), sobrepaso máximo (Mp), tiempo de levantamiento (tl), estos dos para el caso de servomecanismo, para funcionamiento como reguladores se tendrán además el error máximo y el tiempo al error máximo [15]. Así también, mediante la tabla de decisión multicriterio se pudo determinar que la transmisión por engranajes es la mejor opción con un valor de 8.6/10 o (0.086) y en segundo la transmisión por rueda de ginebra con un valor de 7.3/10 o (0.073).

Para futuros trabajos, sería interesante modificar el prototipo de trituración que en la actualidad se encuentra en etapa de ser patentado por el SENADI-Ecuador, permitiera plantear nuevos modelos matemáticos de este proceso, en los que se va considerar como variable de entrada a la velocidad angular y como salida al flujo másico y para esto se usara un S7-1500 de Siemens el cual permite a través de módulos de comunicación inteligente el enlace con MATLAB® y así aplicar estrategias de control avanzadas apoyadas en redes neuronales, Lógica Difusa, L.Q.R, etc..

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Loja (UNL) y al Instituto de Cibernética Matemáticas y Física (ICIMAF) en Cuba, por las facilidades prestadas para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ECSA, "Informe técnico de ECSA," Disponible en: <http://www.ecuacorriente.com/>, 2010.
- [2] D. Sbarbaro, "Control of Crushing circuits with variable speed drivers" in *Proc. of IFAC*, 2005, pp. 1-4.
- [3] Acuña, G, Curilem, M, and Cubillos, F, "Desarrollo de un Sensor Virtual basado en Modelo NARMAX y Máquina de Vectores de Soporte para Molienda Semiautógena," *RIAI (Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial)*, vol. 11, no. 1, pp. 109-112, 2014.
- [4] Santos, A, "Inexpensive apparatus for control laboratory experiments using advanced control methodologies," in *Proc. of the IFAC*, 1999, pp. 61-78
- [5] Moriano, F, "Modelado y control de un nuevo sistema bola viga con levitación magnética", *RIAI (Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial)*, vol. 9, no. 3, pp. 258-261, 2012.
- [6] Benavides, J, Del Pozo, A, Salinas, E, and Ochoa, J, "Identification and control of a laboratory-scale for prototype for crushing copper," *IEEE America Latina*, vol. 14, no. 2, pp. 549-558, 2016.
- [7] Ljung, L, "System Identification Theory for the user: Prentice Hall, 1999.
- [8] Whiten, W, "The Simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression," *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 257-264, 1972.
- [9] Hatch, C, "Simulation of the brenda mine," *Mining Engineering secondary crushing*, pp. 1354-1362, 1982.
- [10] Donovan, J, "Fracture Toughness Based MFracture Toughness Based Models For The Prediction Of Power Consumption," *Product Size, And Capacity Of Jaw Crushers*, 2003.
- [11] Fernández, L, "CADCS," *Revista de Automática del ICIMAF*, pp. 28-33, 2009.
- [12] Gupta, S, "Elements of Control Systems," Prentice-Hall of New Delhi India, 2003.
- [13] SolidWorks, "SolidWorks," Disponible en: www.solidworks.com.
- [14] AutoCad, "AutoCad," Disponible en: www.AutoCad.com.
- [15] Corripio, A., and Smith, C, "Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica," Noriega, 2000.
- [16] Garzón, M., and Domínguez, A, "Control difuso de un motor de inducción," *Revista de Ingeniería Energética*, vol. 25, no. 1, pp. 32-36, 2005.
- [17] Fernández, L, "Identificación de sistemas con los CADCS," *Revista de Automática del ICIMAF*, pp. 5-7, 2012.
- [18] Valera, A, Soriano, A, and Vallés, M, "Plataforma de Bajo Coste para la realización de Trabajos Prácticos de Mecatrónica y Robótica," *RIAI (Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial)*, vol. 11, no. 4, pp. 367-369, 2014.
- [19] Sierra, J, "Diseño e Implementación del Control Inteligente en un motor de corriente continua," Master's thesis, CUJAE-Habana, 2012.
- [20] Torres, M, "Control de subproceso de caudal de aire en unidad manejadora de aire de la planta DPTdel instituto FINLAY," *Revista de Cibernética Aplicada*, pp. 47-51, 2012.
- [21] Vargas, G, Fernández, L, "Identificación y Control del Reflujo de Solvente en un proceso de extracción," *Revista de Automática del ICIMAF*, pp. 79-83, 2012.
- [22] Delgado, L, Fernández, L, and Vargas, G, "Modelación, Simulación y Control del sistema de ventilación de una planta de ingredientes farmacéuticos activos," in *Proc. of the JICIMAF*, 2011, pp. 17-24.
- [23] Pulido, J, "Correlación y Regresión Lineal Simple," Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=E4oVu8i-pnU>, 27 Febrero 2012.
- [24] Shigley, J, "Teoría de Máquinas y mecanismos," Mc Graw Hill, pp. 374-378, 2001.
- [25] Arrizabalaga, N, "Máquinas Prontuario," Técnicas Máquinas Herramientas, pp. 322-323, 1990.
- [26] Mathworks, "Mathworks", Disponible en: www.mathworks.com, 2018.
- [27] Seborg, D, Edgar, T, and Duncan, "Process Dynamics and Control," John Wiley&Sons, Inc, 2004.
- [28] Gobierno de Chile, "Manual General de la Minería y la Metalurgia," Gobierno de Chile, pp. 399-406. 2007.
- [29] Fuerstenau, M, "Principles of Mineral Processing," Society for Mining metallurgy, 2005
- [30] Sutulov, A, "Flotación de Minerales," Master's thesis, Universidad de la Concepción de Chile, 1980.