

## Modelado y Control de Molinos de Caña de Azúcar usando Accionamientos Eléctricos

E. Rosero y J. Ramirez

Grupo de Investigación en Control Industrial, Universidad del Valle, Calle 13  
No. 100-00, Ciudad Universitaria Meléndez, PBX +57 2 3212100, A.A.  
25360, Cali, Colombia, (e-mail: emilros@univalle.edu.co,  
jomiram@univalle.edu.co)

**Resumen:** El rendimiento de la extracción de jugo del proceso de molienda afecta la rentabilidad de una fábrica de azúcar de caña. El proceso de extracción se realiza a través de una serie de molinos que separan el jugo de la fibra de la caña; para maximizar su extracción a una tasa de molienda especificada, se requiere controlar la velocidad de los accionadores y el nivel de la tolva de alimentación. Este artículo presenta el modelado dinámico no lineal a partir de principios físicos, de molinos de caña de azúcar de cuatro mazas accionados con motores eléctricos; se obtienen los parámetros y se validan los modelos. Se diseñan estrategias de control basadas en controladores en cascada y se evalúan con índices de desempeño planteados con base al objetivo principal de maximizar la extracción con confiabilidad de operación. Las estrategias propuestas se comparan en un caso de estudio vía simulación, con las existentes hasta el momento. El análisis muestra que la estrategia de control cascada de par, velocidad angular y altura en la tolva de alimentación es la que alcanza el mejor desempeño. *Copyright © 2009 CEA.*

**Palabras Clave:** Molinos de Caña de Azúcar, Accionamientos Eléctricos, Modelado, Control Cascada.

### 1. INTRODUCCIÓN

La estación de extracción consiste generalmente de 5 ó 6 molinos en cascada, como se muestra en la figura 1. Cada molino consta de 4 mazas. La caña preparada por las picadoras y/o desfibradoras se alimenta al primer molino por medio de un transportador de velocidad variable. El bagazo resultante del primer molino se alimenta al siguiente por medio de un transportador que opera a velocidad fija y así sucesivamente hasta el sexto. El bagazo que sale del último molino se lleva a calderas como combustible. A la entrada del último molino se adiciona agua de imbibición para diluir el jugo y extraer la sacarosa que contiene el material fibroso; el contenido de jugo que resulta de cada extracción, se envía al molino anterior y así sucesivamente hasta el segundo. El contenido de jugo extraído por el primero y segundo molino es enviado a la etapa de proceso.

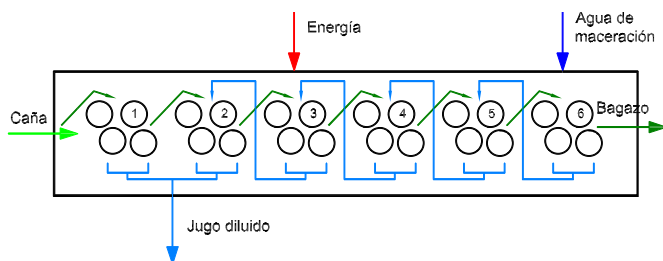


Figura 1. Entradas y salidas del proceso de molienda de caña de azúcar

El bagazo es alimentado a la tolva de alimentación (tanque de sección transversal cuadrada destinado a la canalización del bagazo al molino) por un transportador de rastrillos. Con la

cabeza de presión generada, la rotación de las mazas y la aplicación de presión, el bagazo pasa a través del molino y se extrae el jugo. La figura 2 muestra el esquema de un molino de caña típico. Para reducir el deslizamiento del bagazo con las mazas y la reabsorción (proceso en el cual, el jugo que ha sido extraído por el molino, es absorbido nuevamente por el bagazo saliente), los estudios muestran que la máxima velocidad tangencial de la maza superior es  $300 \text{ mm/s}$  (Hugot, 1986), ya que por encima de esta velocidad se genera un mayor coeficiente de reabsorción y deslizamiento entre el bagazo y las mazas. El proceso requiere que el molino opere en el primer cuadrante de la curva par-velocidad angular, con par y velocidad angular variables. El molino normalmente está accionado con una turbina térmica, un motor hidráulico o un motor eléctrico.

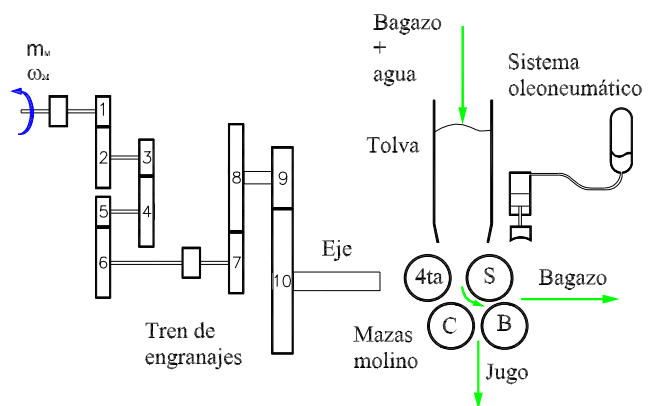


Figura 2. Molino de caña típico en Colombia

Debido a la mejora en eficiencia energética (Rosero, 2006; Rosero *et al.*, 2008) y al alto desempeño dinámico logrado en

la actualidad con motores de inducción, los ingenios están cambiando las turbinas térmicas por motores eléctricos. El motor puede girar a velocidades menores (1800, 1200 ó 900 *rpm*) que la turbina, con una relación de transmisión más pequeña, con menos transmisiones mecánicas y menor par de fricción. El objetivo de la estación de extracción de caña de azúcar es maximizar la extracción y tener confiabilidad de operación minimizando las pérdidas de sacarosa en bagazo, usando como variable manipulada el par motor  $m_M$ , y como variables medidas la altura de la tolva de alimentación  $h$ , la velocidad angular  $\omega$  y la compactación  $\rho$  (es la densidad volumétrica de fibra en un punto, despreciando el jugo). El problema es cómo controlar el par motor  $m_M$  para que las pérdidas de sacarosa en bagazo sean mínimas (maximizar extracción) y haya confiabilidad de operación, sujeto a las restricciones de pares máximos, altura máxima en la tolva de alimentación, energía disponible, humedad del bagazo, perturbaciones en la calidad de la caña, preparación de la caña, y el flujo de agua adicionada a los molinos.

Las estrategias actuales de control de molinos se utilizan para dar seguridad de operación y no para optimizar el proceso. Para mejorar el desempeño dinámico y optimizar la operación del tren de molienda se requiere diseñar estrategias de control que permitan que la varianza de las variables controladas, par y compactación, sean bajas alrededor de los valores de referencia (Landau and Rolland, 1994), para extraer mayor cantidad de jugo cuidando las transmisiones mecánicas, ya que al reducir la amplitud de variación de par se reduce la posibilidad de generar fatiga en los elementos mecánicos. Esto se ilustra en la figura 3.

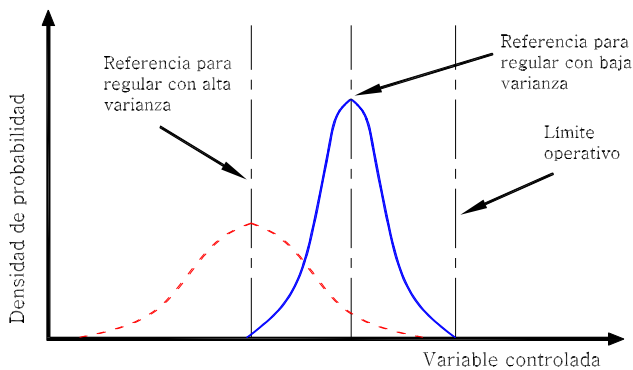


Figura 3. Histogramas para un control *bueno* y un control *pobre* en un molino de caña de azúcar

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se realiza una revisión bibliográfica de las diferentes arquitecturas de control existentes en molinos de caña de azúcar, referenciando resultados reportados previamente en la literatura. En la Sección 3 se realiza el modelado físico del molino de caña de azúcar, y su validación experimental. Usando simulación, en la sección 4 se diseñan diferentes estrategias de control, y se comparan con las estrategias existentes a través de índices de desempeño y como resultado de la evaluación, la estrategia de control cascada  $h - \omega - m_{med}$  alcanza el mejor desempeño. El análisis de resultados y las conclusiones se presentan en las Secciones 5 y 6 respectivamente.

## 2. ESFUERZOS PREVIOS

Los trabajos realizados en molinos de caña apuntan a comprender el proceso físico para ayudar a la preparación y molienda de caña, y determinar la configuración estructural óptima del molino para maximizar la extracción del jugo (Murry and Holt, 1967; Loughran, 1990). Estos modelos son complejos, usualmente estáticos, no lineales y contienen muchos parámetros que no se pueden determinar fácilmente en forma directa.

En el área de modelado y control de molinos de caña de azúcar se conocen trabajos llevados a cabo por (Partanen, 1995), que detalla la aplicación de una identificación iterativa y metodologías de diseño de estrategias de control basadas en LQG (Linear Quadratic Gaussian) que fueron implementadas en ingenios australianos; es una técnica de un alto grado de complejidad y requiere una gran habilidad del experto en control para la identificación del modelo y el diseño de la estrategia de control. (West, 1997) realiza el modelado basado en la aplicación de escalones para observar su respuesta, estos modelos son lineales y se utilizan para implementar diferentes estrategias de control como PID, técnicas de control multivariable y de espacio de estados. Se utilizan dos actuadores para manipular la compuerta a la salida de la tolva de alimentación (chute en inglés) para regular flujo de bagazo de entrada y la velocidad, para regular el par medido y la altura de la tolva. Los controladores buscan disminuir el efecto de la perturbación del par de carga usando como variable manipulada el flujo de bagazo de entrada del molino. También se ha desarrollado el modelado dinámico no lineal de la tolva de alimentación basado en el principio de balance de masa (Ozkocak *et al.*, 1998), un modelo paramétrico de dos variables el cual se ajusta acorde a las propiedades de la caña. Con el objeto de mejorar la extracción, también propusieron un control predictivo basado en modelos (MPC) variando el flujo de agua adicionada a molinos (Ozkocak *et al.*, 2000).

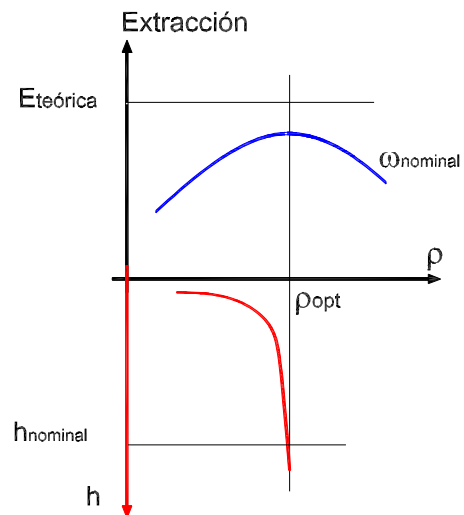


Figura 4. Extracción vs. Compactación y Altura vs. Compactación para un molino

Según (Gómez *et al.*, 2005; Crawford, 1959) existe una compactación óptima  $\rho_{opt}$  a la cual existe la mayor extracción teórica posible, y se obtiene a velocidades bajas, pero existe una limitación: el flujo de caña a moler en el tren de molienda. Si el molino opera a una compactación baja, se deja de extraer el brix (cantidad de sólidos disueltos en una solución) del bagazo

ya que la reducción volumétrica no es la óptima, pero si el molino opera a una compactación superior a la óptima, también se deja de extraer ya que aumenta la reabsorción, y además se pueden generar pares elevados que producen fallas o daños acumulativos en las transmisiones mecánicas, así como mayor consumo de energía. A mayor altura en la tolva se obtiene mayor compactación como se muestra en la figura 4.

De estas condiciones se deduce que el molino debe operar a compactación óptima constante para que la extracción sea máxima, lo cual requiere flujo de bagazo constante y esto se logra manipulando la velocidad angular del accionamiento para absorber las fluctuaciones de carga fibrosa, manteniendo una altura de bagazo lo más alta posible.

### 2.1 Estrategias de control existentes con dos actuadores

Se tienen dos lazos de control independientes: *regulación de altura de la tolva de alimentación* que cambia la velocidad de la turbina para mantener el nivel de bagazo en la referencia deseada y de *regulación de par* que cambia la posición de la compuerta de la tolva de alimentación para mantener el par en el valor deseado y por debajo del nivel crítico para evitar sobrecargas, esta condición permite regular el flujo de bagazo de entrada al molino que es la perturbación de carga del sistema. La figura 5 muestra un molino típico australiano.

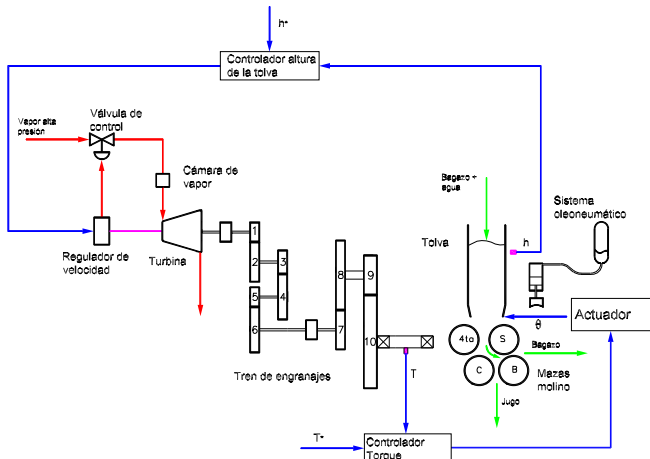


Figura 5. Lazos de control existentes en Australia

### 2.2 Estrategias de control existentes con un actuador

Únicamente se encuentra disponible el lazo de control de regulación de altura de la tolva y de acuerdo al accionador se encuentran las siguientes estrategias:

**Con accionamiento térmico:** los molinos son regulados en velocidad angular constante (sin medición de altura de la tolva), ó controlando altura de la tolva variando la velocidad angular a través del controlador proporcional  $G_h(s)$  como se muestra en la figura 6.

**Con accionamiento eléctrico:** La figura 7 muestra una estrategia de control existente donde  $G_i(s)$  y  $G_h(s)$  son controladores proporcionales de corriente y de nivel que entregan la referencia de velocidad a un selector del valor más alto de las dos referencias, que actúa sobre un controlador de velocidad  $G_\omega(s)$  de acción PI, y este a la vez entrega una referencia a

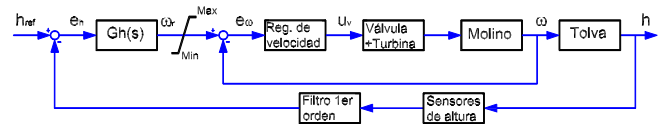


Figura 6. Estrategia de control con accionamiento térmico

un controlador de velocidad que se encuentra en el variador de velocidad. Este accionamiento no tiene sensor de velocidad. Se utiliza la corriente como emulación del par para limitación, lazos redundantes de velocidad, hay control selectivo (Corriente - Nivel), se utiliza el variador controlado en velocidad con estimador de velocidad, y con limitadores de velocidad y corriente.

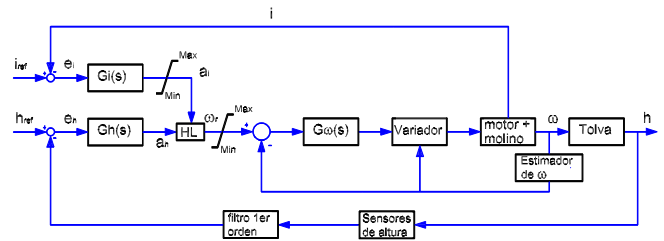


Figura 7. Estrategia de control con accionamiento eléctrico

En general, los molinos del segundo al sexto son idénticos en operación; usan la misma instrumentación y estructura de control de la figura 6 cuando el accionador es una turbina ó similar a la figura 7 cuando su accionador es un motor eléctrico. Los lazos de cada molino de la estación de extracción son independientes. Los parámetros de los controladores se determinan a ensayo y error a partir de la experiencia de los ingenieros de proceso. Las estructuras de control anteriores utilizadas en molinos con motores eléctricos no son estándares, ya que las dinámicas de corriente son mucho más rápidas que las dinámicas de velocidad, además, hay redundancia de controladores. Todo esto conlleva a una reducción del desempeño dinámico del proceso y a la vez, una reducción de la vida útil de los elementos mecánicos por las altas variaciones de par.

## 3. MODELADO

### 3.1 Ecuación Mecánica del Molino

Aplicando la segunda ley de Newton al sistema rotacional del molino se obtiene:

$$m_M(t) - m_L(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (1)$$

donde  $m_M(t)$  es el par motor,  $\omega(t)$  la velocidad angular del accionador,  $J$  el momento de inercia equivalente de las transmisiones mecánicas, las mazas y de las coronas referidas al eje del accionamiento. El par de carga  $m_L$  se define como:

$$m_L = K_{mfb} \phi_s + f_f \text{sign}(\omega) + \sum_{n=1}^l B_i \sin(\omega_i t) + f(t) \quad (2)$$

donde  $K_{mfb}$  es una constante que relaciona el par con el flujo de bagazo,  $B_i$  son amplitudes a diferentes frecuencias  $\omega_i$ , que relacionan armónicos de par medidos por el contacto de dientes de las ruedas, desalineamientos, excentricidades y

efectos desconocidos,  $f_f$  una constante que relaciona el par debido a la fricción como función de la velocidad angular,  $f(t)$  es una función de ruido aleatorio.

La velocidad de la maza superior  $\omega_{ms}(t)$ , se define como:

$$\omega_{ms}(t) = \frac{\omega(t)}{n} \quad (3)$$

donde  $n$  es la relación de engranajes de toda la transmisión. El par en el eje de la maza superior  $m_{ms}$ , se puede escribir como:

$$m_{ms}(t) = n\eta m_t(t) \quad (4)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia del tren de engranajes,  $m_t$  el par en el eje del accionador.

### 3.2 Tolva de alimentación

El objetivo de la tolva de alimentación es mantener el nivel de bagazo dentro de los límites físicos, suavizar las variaciones del flujo de alimentación de bagazo y suministrar una alimentación uniforme a las mazas de los molinos, como se muestra en la figura 8. La mayoría de las tolvas de los molinos de los ingenios americanos no tienen compuerta (flap en inglés) para modificar el volumen de bagazo y la geometría de salida de la tolva.

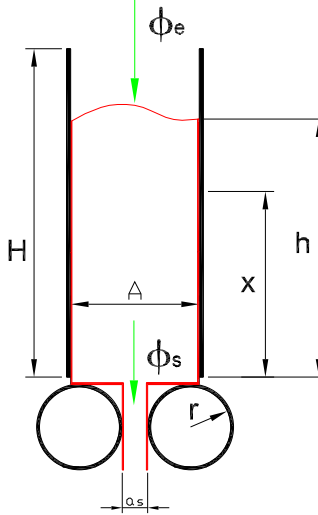


Figura 8. Aproximación esquemática de la tolva de alimentación

Realizando el balance de masa de la tolva de alimentación, se tiene:

$$\phi_e(t) - \phi_s(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial h} \frac{dh(t)}{dt} \quad (5)$$

donde  $\phi_e(t)$  es el flujo de masa que está entrando a la tolva,  $\phi_s(t)$  el flujo de masa que está saliendo de la tolva y que entra a las mazas de los molinos,  $\frac{d\phi}{dt}$  la variación de la masa en la tolva.

La función de densidad del bagazo (compactación)  $\rho(x, h)$  en la tolva de alimentación, depende del número del molino donde esté ubicada la tolva y de la altura (West, 1997), como se observa en la figura 9.

El flujo de masa a la salida del molino se puede considerar como:

$$\phi_s(t) = FK_{wf}A_s v(t)\rho(0, h) = FK_{wf}A_s r \frac{\omega_t(t)}{n} \rho(0, h) \quad (6)$$

donde  $K_{wf}$  es una constante proporcional,  $\rho(0, h)$  la densidad del bagazo a la salida de la tolva,  $L$  el largo de la maza

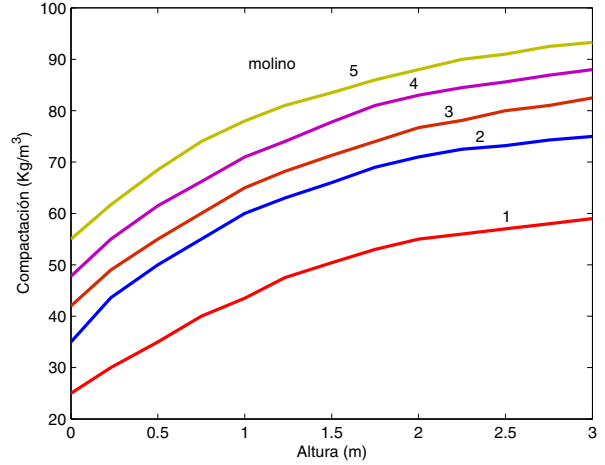


Figura 9. Efecto de la altura del bagazo en la tolva en la compactación para 5 molinos

superior,  $a_s$  el ancho o espacio de separación entre la maza superior y cuarta,  $A_s = La_s$  el área transversal generada entre la maza superior y cuarta,  $v(t) = r\omega_s(t) = r\frac{\omega(t)}{n}$  la velocidad tangencial de la maza superior,  $F$  la constante que puede variar entre  $0,5 \leq F \leq 1$ , esta constante depende de la calidad de superficie rugosa de las mazas (tiempo de operación de las mazas) y modela el deslizamiento entre el bagazo y la superficie de las mazas.

La masa total  $\phi$  en la tolva en un tiempo  $t$  es:

$$\phi(t) = \int_{x_1}^h A\rho(x, h)dx \quad (7)$$

donde  $A$  es el área transversal de la tolva de alimentación. El balance de masa en la tolva puede ser escrito como:

$$\phi_e(t) - \phi_s(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{x_1}^h A\rho(x, h)dx \quad (8)$$

El flujo de bagazo que entra a la tolva  $\phi_e(t)$ , es función de la densidad  $\rho$ , condiciones climatológicas, variedad y preparación de la caña.

Si se define:

$$q = \int_0^h \rho(x, h)dx \quad (9)$$

Se obtiene:

$$\frac{\partial q}{\partial h} = \rho(0, h) \quad (10)$$

que es la función de densidad de bagazo en la tolva. Luego el balance de masa en la tolva de alimentación es:

$$\phi_e - FK_{wf}A_s r \frac{\omega_t(t)}{n} \rho(0, h) = A\rho(0, h) \frac{dh}{dt} \quad (11)$$

### 3.3 Sensores

La altura de la tolva se mide normalmente por una serie de sensores capacitivos on-off espaciados uniformemente a lo largo de la longitud de la tolva, como se observa en la figura 10. La salida de estos sensores son eléctricamente combinados para generar un valor promedio de altura, que genera una función continua cuantizada en amplitud  $h_q$ . Cada sensor está espaciado  $\frac{h_0}{n_s}$ , donde  $h_0$  es la altura total de la tolva y  $n_s$  el número de sensores.

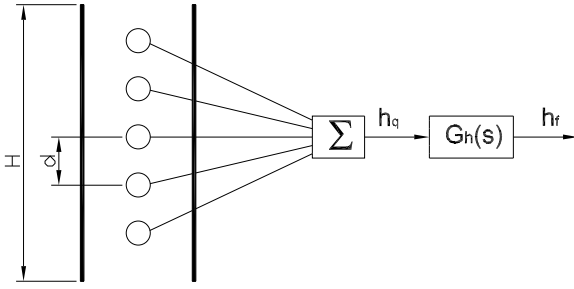


Figura 10. Esquema de los sensores de altura de la tolva

Para obtener la posición del sensor activado se puede escribir:

$$ps = \text{fix}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (12)$$

donde  $ps$  es la posición del sensor activado,  $\text{fix}()$  función que redondea hacia el entero inferior más próximo,  $h$  la altura de la tolva, y puede tomar valores entre  $0 \leq h \leq h_0$ ,  $d$  la distancia entre sensores.

Para obtener la altura como una función continua cuantizada en amplitud de acuerdo a la posición del sensor activado, se puede escribir:

$$h_q = ps * d \quad (13)$$

donde  $h_q$  es la función cuantizada en amplitud de altura de la tolva, y toma valores entre  $0 \leq h \leq h_0$ .

Antes de ser realimentada, la señal  $h_q$  se pasa a través de un filtro  $G_h(s)$ :

$$G_h(s) = \frac{h_f}{h_q} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (14)$$

donde  $h_f$  es la función filtrada de altura de bagazo en la tolva.

### 3.4 Accionador

Los modelos del accionamiento térmico se pueden revisar en (Rosero, 2006). Para modelar el accionador eléctrico se utiliza un modelo reducido del motor de inducción (Leonhard, 2001), un modelo que recoge las dinámicas más simples y desprecia las dinámicas de alto orden, como se muestra en la figura 11.

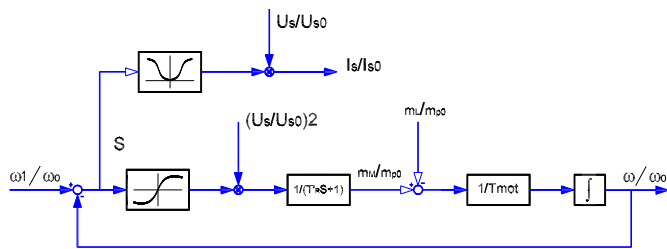


Figura 11. Diagrama de bloques simplificado del modelo del motor de inducción

La magnitud de la corriente del estator normalizada  $\frac{I_s}{I_{s0}}$  es una función del deslizamiento  $S$ , el factor de dispersión  $\sigma$ , el deslizamiento al cual se genera el torque máximo  $S_P$  con resistencia de estator cero, y está dada por:

$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\sigma} \frac{S}{S_P}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{S}{S_P}\right)^2}} \quad (15)$$

Cuando el motor de inducción es parte de un accionamiento de velocidad variable, el voltaje del estator  $U_s$  y la frecuencia  $\omega_1$  pueden diferir de los valores nominales  $U_{s0}$ ,  $\omega_0$ , por lo tanto

$$m_M = m_{p0} \left( \frac{U_s/\omega_1}{U_{s0}/\omega_0} \right)^2 \frac{2}{S/S_P + S_P/S} \quad (16)$$

donde  $m_{p0} = \frac{3}{2} \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{U_{s0}^2}{\omega_0^2 L_S}$  es el par máximo (para  $R_s = 0$ ) a la frecuencia y voltaje nominal. Esto indica que el voltaje aumenta con el cuadrado del flujo; la razón es que la corriente del rotor, causada por la inducción magnética, es también una función lineal del flujo. La constante de tiempo del modelo se define como  $T'_R = \frac{\sigma L_R}{R_R}$ , la constante de tiempo mecánica se define como  $T_{mot} = \frac{J\omega}{m_{p0}}$ .

### 3.5 Validación experimental del modelo

**Par de carga:** El registro de par del molino 5 del ingenio Pichichí con el sistema operando con carga en estado estable, se observa en la figura 12. Realizando la transformada rápida de Fourier se obtiene la figura 13, donde aparecen armónicos a la frecuencia de rotación del eje de la maza superior ( $f=0,07$  hz), contacto de los dientes de las coronas ( $f=1,14$  hz) y caída de bagazo de la tolva de alimentación ( $f=1,2$  hz). Con estas mediciones experimentales se puede caracterizar el par de carga  $m_L$  de la ecuación 1.

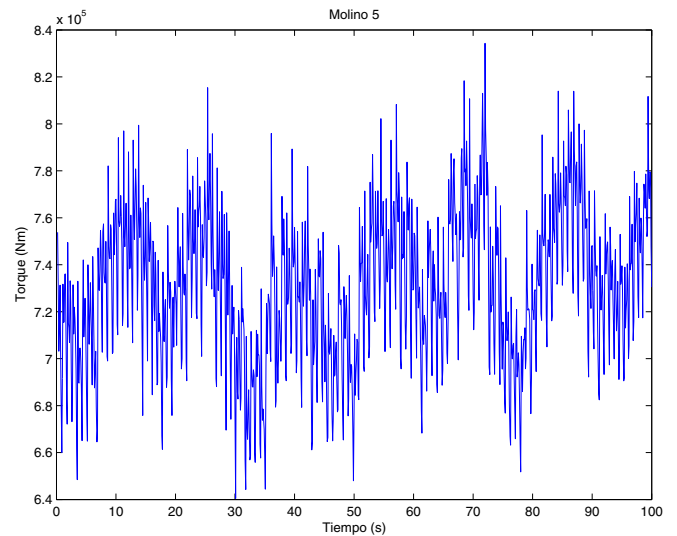


Figura 12. Registro de datos del sistema con carga

**Modelo de Fricción:** Se registró el par y la velocidad angular del molino en estado estable, en vacío, a diferentes velocidades de referencia, como se muestra en la figura 14. A pequeñas variaciones de velocidad angular el par no cambia, por lo tanto se tiene par de fricción de Coulomb, que no depende de la velocidad. La fricción viscosa es despreciable. Así se obtiene:

$$m_f = f_f \text{sign}(\omega) \quad (17)$$

**Modelo de sensores** La figura 15 muestra la validación de los sensores de la tolva. Esta prueba se realizó a velocidad constante y aprovechando la entrada de bagazo en la tolva en un instante dado y la parada repentina de la banda transportadora que alimenta a la tolva para observar la descarga del bagazo. La constante de tiempo de la ecuación 1 es de  $0,5$  seg.

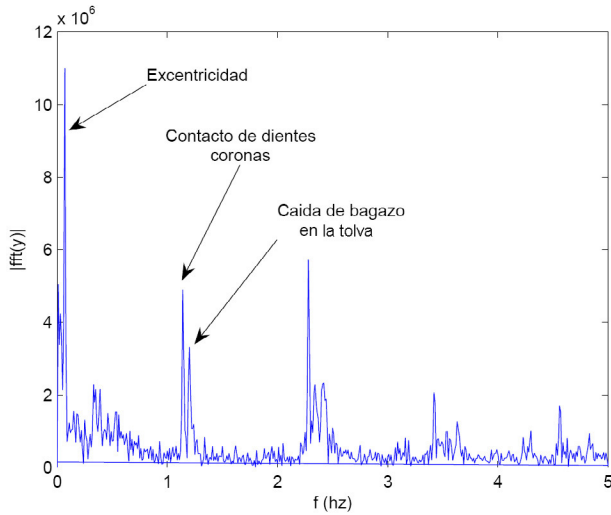


Figura 13. Magnitud - Frecuencia del molino con carga

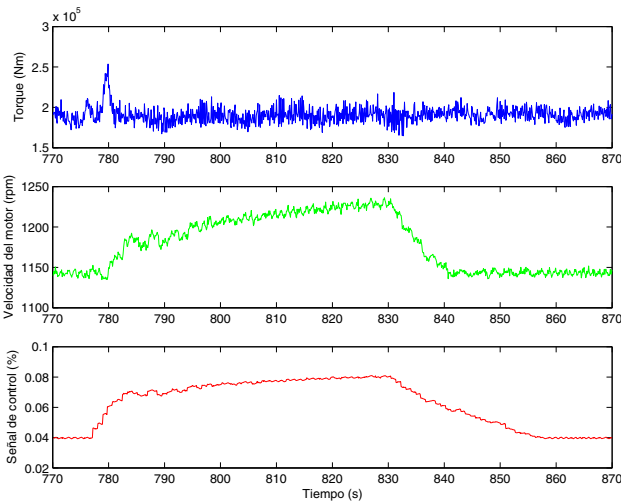


Figura 14. Registro de datos a diferentes velocidades en vacío

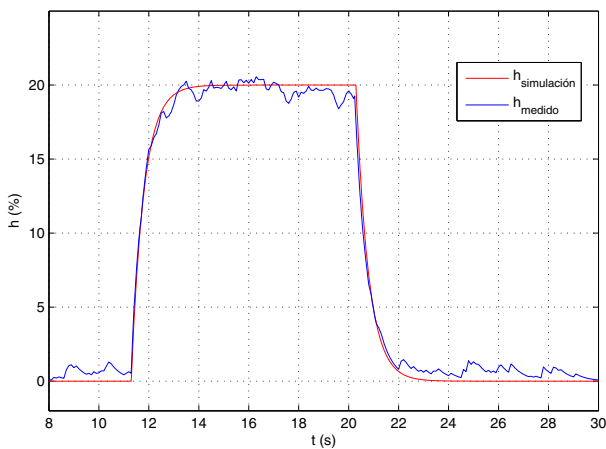


Figura 15. Validación de los sensores de la tolva de alimentación

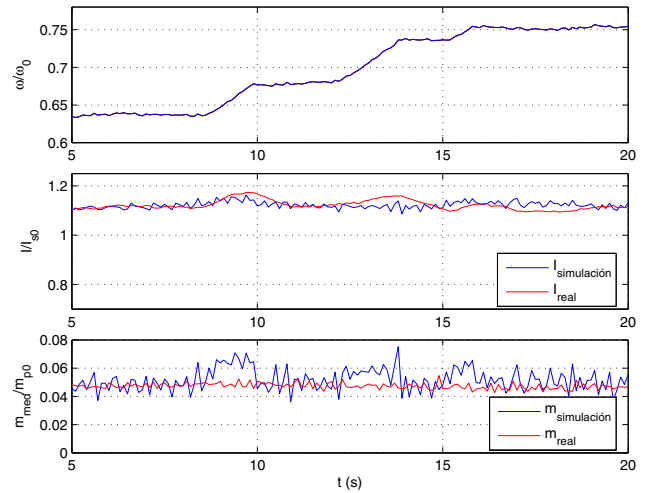


Figura 16. Validación estática del molino

**Validación del sistema** La validación del modelo se realizó en el quinto molino de un ingenio de la región denominado ingenio A. El modelo del molino de caña de azúcar se normalizó en base a los siguientes parámetros nominales:  $\omega_0=1800 \text{ rpm}$ ,  $h_0= 1,3 \text{ m}$ ,  $\phi_0= 8 \text{ Kg/s}$ ,  $m_{p0}= 13200 \text{ Nm}$ ,  $J = 18,22 \text{ Kgm}^2$   $F=1$ , considerando que las mazas de los molinos son nuevas.

La validación estática del modelo se muestra en la figura 16. La prueba se realizó con el molino operando sin carga (no hay bagazo entrando a la tolva) y se aplicó un cambio en la referencia de velocidad angular del motor. Se observa que existe una buena aproximación de los valores medios de par y corriente del modelo con los datos medidos. Se observa también que los cambios generados en el par motor no se reflejan en el par medido del molino, esto se explica por la lejanía del punto de medición ubicado en el eje rectangular que conecta las transmisiones mecánicas y la maza superior del molino al eje del accionamiento, ya que existen huelgos en las transmisiones mecánicas y además estas son flexibles. El par medido refleja mejor el par de carga, esta es una información importante ya que el interés desde el punto de vista del control es minimizar las variaciones de carga. Por lo tanto entre más cercano esté el sensor de par a la carga mejores serán las posibilidades de mejorar el desempeño del molino cuando se utilice una estrategia de control de par.

La figura 17 muestra la validación del modelo frente a la entrada de carga en el molino. La prueba se realizó a velocidad constante y con bagazo entrando a la tolva, aunque no se presentó altura en la tolva. Esta validación muestra que el par y la corriente del modelo si aproximan muy bien a los valores medidos. Se puede observar que el modelo refleja el comportamiento del molino de caña. Debido a dificultades en la manipulación de variables en sitio sólo se registraron datos en ciertas condiciones de operación.

#### 4. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

##### 4.1 Planteamiento del problema de control

A la estación de extracción entra caña preparada que pasa a través de los molinos, se adiciona agua para mejorar la extracción y energía para mover los molinos. Los productos obtenidos son jugo diluído en agua que es enviado a evaporadores y

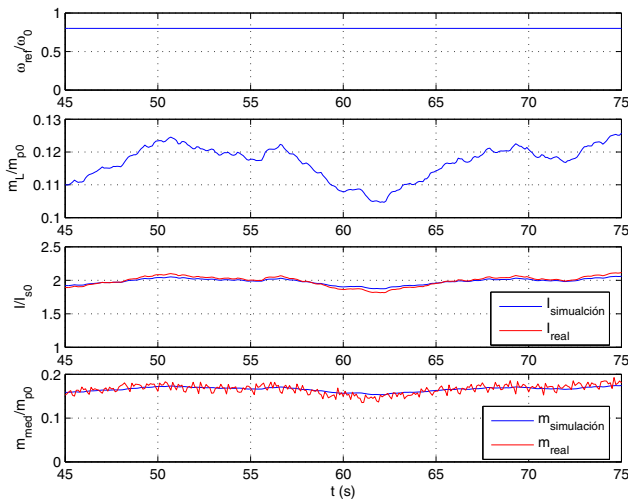


Figura 17. Validación ante un cambio en el flujo de bagazo de entrada

bagazo húmedo que es enviado a calderas como combustible, como se muestra en la figura 1.

El objetivo del proceso de molienda en cada molino es maximizar la extracción, minimizando las pérdidas de sacarosa en bagazo, el consumo de energía y la humedad en el bagazo para una tasa de caña (flujo de caña) a moler definida. Para ello se requiere que cada uno de los molinos opere en valor máximo de altura de la tolva de alimentación, que la estación de extracción tenga una regulación de flujo de agua óptima adicionada a molinos, así como buscar los mejores ajustes de los molinos que solamente se pueden realizar en cada parada. En este artículo únicamente nos ocuparemos del diseño y evaluación de estrategias de control con el objetivo principal de maximizar la extracción, con confiabilidad de operación, y a la vez regular y rechazar perturbaciones de un molino de caña de azúcar. El modelado dinámico de la estación de molienda, compuesta por 6 molinos, se presenta en (Alvarez *et al.*, 2008). Estrategias de control para maximizar la extracción total de la estación de molienda se desarrollará en una posterior investigación.

#### 4.2 Estrategias de control propuestas para molinos de caña con accionamientos eléctricos

Para que un tren de molienda opere en óptimas condiciones y pueda extraer la mayor cantidad de jugo, la operación del molino debe realizarse a compactación óptima, flujo de caña y bagazo constante, nivel de la tolva al 80 %, se debe definir el ajuste de mazas, presiones hidráulicas y la inyección de agua para la compactación óptima.

Debido a que en los molinos americanos sólo existe un actuador y con el objetivo de reducir las perturbaciones, se utilizará realimentación local (control en cascada). La ventaja del controlador en cascada es que subdivide una planta compleja para resolver el problema de control a pasos mediante controladores simples; los controladores están menos sujetos a saturación, se eliminan rápidamente los efectos de disturbios internos, se pueden limitar señales intermedias importantes, localiza alinealidades y el diseño e implementación es sistemático por lazos. La estrategia de control que se propone se muestra en la figura 18.

Para el diseño de los controladores se utilizó modelos reducidos lineales, pero su desempeño se evalúa en el modelo completo.

En el lazo de control interno (Ver figura 18) se diseña un controlador PI de par  $G_{ta}$ , para compensar la perturbación del par de carga  $m_L/m_{p0}$ , manipulando el par motor  $m_M/m_{p0}$ , evitando altas variaciones de par y propagación a través del proceso, con lo cual se alarga la vida útil de las transmisiones y se evita alcanzar valores límites máximos de diseño que puedan dañar las transmisiones mecánicas. Para el lazo de control intermedio, se diseña un controlador PI,  $G_\omega$ , para regular la velocidad angular  $\omega$  dentro de los límites permitidos por el proceso. En el lazo de control externo, se diseña un controlador de altura de la tolva de alimentación  $G_h$ , con un controlador proporcional de tal forma que le de al sistema un buen desempeño dinámico ante perturbaciones y a la vez, por el efecto de la señal medida de altura cuantizada no genere fuertes oscilaciones, es un compromiso entre desempeño (error pequeño de la señal de error) y oscilaciones a presentarse en el sistema. Se diseñan limitadores de par para evitar sobrepasos de los pares máximos de diseño y evitar fallas en las transmisiones mecánicas; se diseñan limitadores de velocidad máxima por condiciones de proceso. También se incluyen algoritmos de anti embalamientos para evitar saturaciones de la señal de control en los PI diseñados y filtrado de referencias del controlador para evitar sobrepasos adicionales en los cambios de referencia.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones con los controladores diseñados se pueden ver en las figuras 19 y 20. Se observa el comportamiento de la corriente del motor  $I/I_{s0}$ , el torque motor  $m_M/m_{p0}$ , la velocidad angular del motor  $\omega/\omega_0$ , la altura de la tolva de alimentación  $h/h_0$ , en el arranque y operación normal del molino con carga, ante entradas escalones de flujo de bagazo  $\phi_{be}/\phi_{bs0}$ .

En la figura 19 se muestran los resultados de la simulación de un molino accionado con motor eléctrico, con 5 sensores de altura en la tolva de alimentación, utilizando un filtro de primer orden y un filtro de media móvil para la estrategia de control cascada  $h-\omega-m_{med}$ . El filtro de media móvil mejora el desempeño del molino comparado con un filtro de primer orden, disminuyendo las oscilaciones de par, corriente, velocidad y altura, suavizando las señales y por ende la operación del molino.

La desventaja del filtro de primer orden es que incluye un retardo  $t = 0,54$  s en la señal medida y la constante de tiempo del lazo equivalente es de 50 ms, mucho mas rápida que la constante de tiempo del filtro de los sensores. En los molinos accionados con turbinas el filtro de primer orden está en los órdenes de las dinámicas del proceso.

En la figura 20 se muestran los resultados de simulación del control en cascada  $h-\omega-m_{med}$  con filtro de media móvil con 5 y 10 sensores de altura en la tolva y medición continua de altura, ante las perturbaciones de flujo de entrada. Si se aumenta la cantidad de sensores y con la utilización de un filtro de media móvil se mejora aun más el desempeño dinámico del molino, reduciendo las variaciones de par y velocidad y del error de altura de la tolva.

Con la estrategia de control cascada  $h-\omega-m_{med}$  diseñada, el sistema tiene la capacidad de arrancar el molino con la tolva llena, además puede ir a velocidad cero si no hay flujo de bagazo en la entrada. El sistema rechaza las perturbaciones de

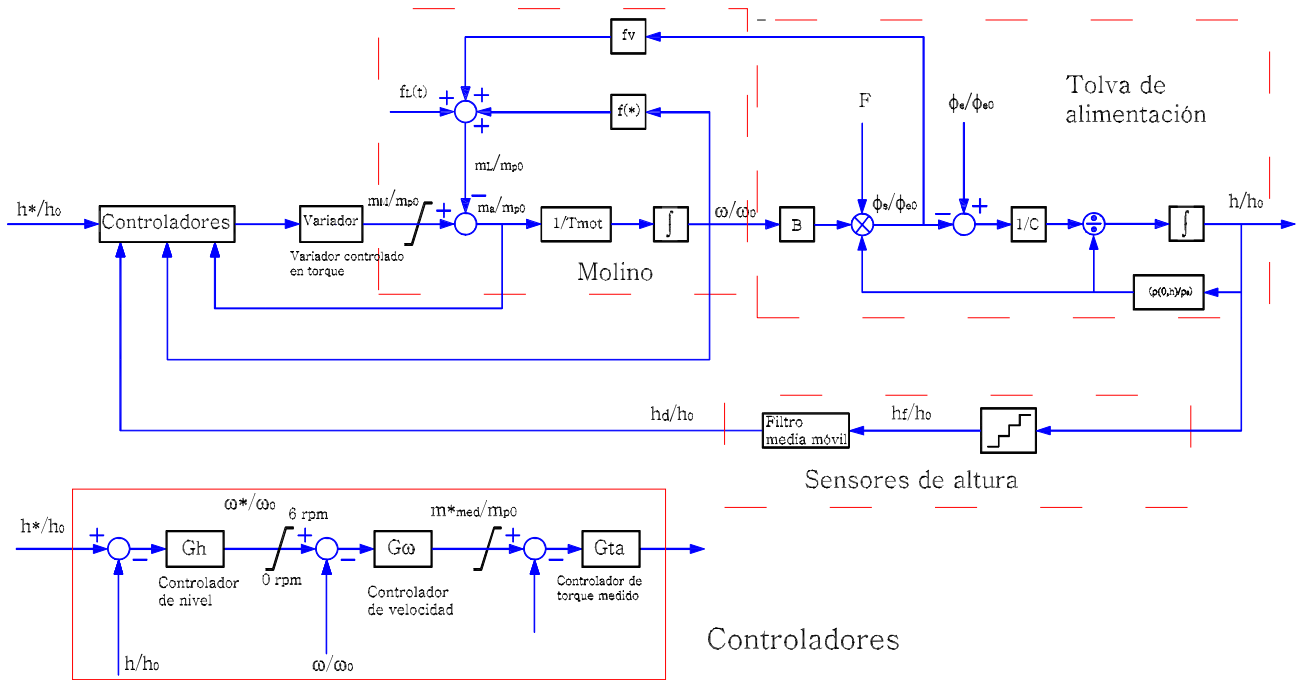


Figura 18. Estrategia de control propuesta para el molino de caña de azúcar

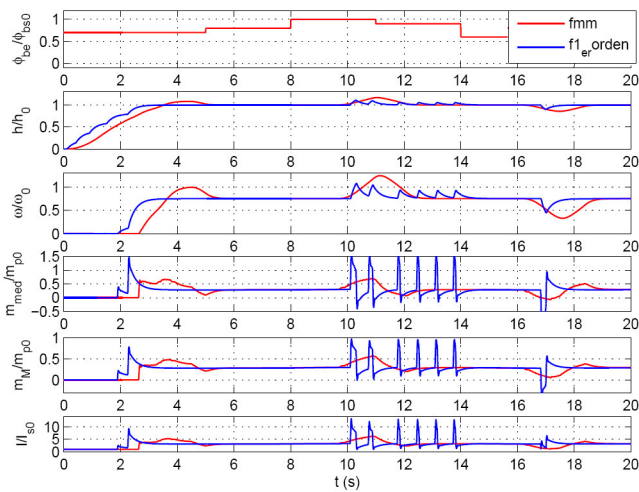


Figura 19. Comparación del desempeño del sistema cascada  $h - \omega - m_{med}$  con 5 sensores de altura de bagazo con filtro de primer orden ( $f1_{erorden}$ ) y filtro de media móvil (fmm)

par en menos de 0,05 s, pero se observan altas oscilaciones en velocidad y par, ya que la señal medida de altura en la tolva entrega una señal cuantizada en amplitud y el filtro retarda la señal medida degradando el desempeño dinámico del molino. El mejor desempeño se obtiene cuando la señal medida de la altura de la tolva se realiza en forma continua, actualmente eso no ha sido posible, por ello se utilizan sensores todo-nada.

5.1 Indicadores de desempeño

**Caso de estudio** Se consideró como caso de estudio un molino de caña de azúcar de un ingenio de la región denominado A, accionado por un motor eléctrico con mazas de 1,83 m (72 in)

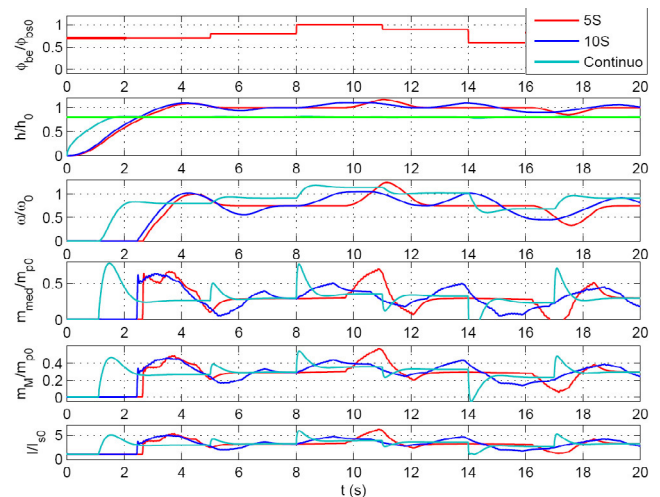


Figura 20. Desempeño del sistema cascada  $h - \omega - m_{med}$  con 5 y 10 sensores de altura con filtro de media móvil, y señal medida continua de altura

de diámetro, con una velocidad máxima de 6 rpm en la maza superior y una relación de transmisión de 720. Se considera una perturbación del molino compuesta de una señal de flujo de bagazo de entrada normalizado  $\phi_{be}/\phi_{be0}$  la cual es modulada por un periodo  $T = 1,2$  s, que es la frecuencia de caída del bagazo a la tolva de alimentación, con ciclo de servicio del 80 % para acercarse a la condición de suministro de bagazo por lotes de las bandas transportadoras mas una señal gaussiana para modelar los efectos desconocidos. Con esta perturbación se evaluarán las estrategias de control diseñadas para un periodo de 100 s. La perturbación definida se muestra en la figura 21.

**Indices de evaluación de las estrategias de control** El criterio que se utilizará para evaluar el desempeño de los contro-



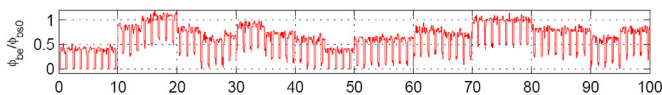


Figura 21. Definición de la perturbación de carga para la evaluación de desempeño de las estrategias de control diseñadas

ladores ante perturbaciones es el criterio de la integral del error cuadrático normalizado en el intervalo dado. Para evaluar el desempeño del controlador de nivel, velocidad y par medido respectivamente se utiliza:  $ISEh = \int_0^T e_h^2(t)dt$ ,  $ISE\omega = \int_0^T e_\omega^2(t)dt$ ,  $ISEm_{med} = \int_0^T e_{m_{med}}^2(t)dt$ , donde  $e_h$  es el error de altura de la tolva,  $e_\omega$  el error de velocidad y  $e_{med}$  el error de par medido.

**Índices de evaluación del proceso** Para evaluar el desempeño del proceso se utilizará el consumo energético del molino y la eficiencia de extracción. Para evaluar la energía consumida  $E_c$  en el molino en un intervalo dado:

$$E_c = \int_0^T VI(t)dt \quad (18)$$

donde  $V$  es el voltaje de alimentación,  $I$  la corriente del motor.

También se deben considerar la media  $\bar{x}$  y la desviación estándar  $\sigma$  del par para evaluar el sistema. La desviación estándar es para conocer que tanto se reduce o aumenta la dispersión de la señal de par frente a la media. La media se define como:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  donde  $n$  es el número de elementos de la muestra. La desviación estándar se define como:  $\sigma = \left( \left( \frac{1}{n-1} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$ .

**Evaluación del desempeño dinámico del molino de caña** Para una altura de  $h/h_0 = 80\%$ , la perturbación de bagazo de entrada  $\phi_{be}/\phi_{be0}$  dado, se evaluaron las siguientes estrategias de control:

- Cascada ( $h - \omega - m_{med}$ ), con 5 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Cascada  $h - \omega - m_{med}$  5S fmm)
- Cascada ( $h - \omega - m_{med}$ ), con 10 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Cascada  $h - \omega - m_{med}$  10S fmm).
- Cascada ( $h - \omega$ ) con 5 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Cascada  $h - \omega$  5S fmm).
- Cascada ( $h - \omega$ ) con 10 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Cascada  $h - \omega$  10S fmm).
- Selectivo:  $m_{med}^*$  ó  $h - \omega$ , con 5 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Selectivo  $m_{med}^*$  ó  $h - \omega$  5S fmm).
- Selectivo:  $m_{med}^*$  ó  $h - \omega$ , con 10 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Selectivo  $m_{med}^*$  ó  $h - \omega$  10S fmm).
- Ingenio A, con 5 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil (Ingenio A).

No se evalúan las estrategias de control para turbinas ya que por sus dinámicas no son capaces de reducir la perturbación propuesta.

La evaluación de las diferentes estrategias de control se muestran en la tabla 1. El flujo de fibra total normalizado que pasó a través del molino es 62,44 Kg.

Se observa que los valores de  $ISEh$  para todas las estrategias evaluadas son grandes, esto es debido a que sólo se ha incluido un controlador proporcional  $P$  en el lazo de control de altura de la tolva. Si se aumenta la cantidad de sensores para medir la altura de la tolva se observa que este índice se disminuye aproximadamente en 1/3. El  $ISEh$  del controlador montado en el ingenio A es casi 2 veces más grande que cualquiera de las estrategias de control propuestas. Esto indica que el molino no opera en la compactación adecuada y por lo tanto habrá menor extracción de jugo. Entre más pequeño sea el valor de  $ISEh$  mejor es el desempeño dinámico del molino y mejor es la extracción. Los índices de  $ISH\omega$  y  $ISEm_{med}$  son pequeños excepto en la estrategia del Ingenio A, esto es debido a la limitación de la velocidad angular mínima impuesta y a la estrategia atípica implementada.

**Costo-Desempeño** El costo está compuesto por la relación entre la energía consumida y la cantidad de fibra molida  $E_c/\phi_{beT}$  en un tiempo dado que evalúa la cantidad de energía requerida para moler una misma cantidad de fibra; la relación entre el par medio y la desviación estándar  $\bar{x}/\sigma$  evalúa las variaciones de par en el molino y la relación  $1/ISEh$  evalúa el efecto de la extracción, entre más grande sea este índice mejor será la extracción en el molino de caña. Los resultados se observan en la figura 22. Para mejorar el desempeño del proceso

Figura 22. Costo - Desempeño del molino de caña de azúcar

de molienda, mayor extracción y menos variaciones de par, con mínimo costo de consumo de energía, la mejor estrategia de control es cascada  $h - \omega - m_{med}$  y cascada  $h - \omega$  con 10 sensores de altura en la tolva de alimentación y filtro de media móvil, pero la estrategia cascada  $h - \omega$  consume mayor cantidad de energía. Si se aumenta la cantidad de sensores de altura de la tolva se mejora notablemente el desempeño dinámico para cualquiera de las estrategias diseñadas.

La estrategia de control selectiva  $h - \omega$  ó  $m_{med}$ , consume mayor cantidad de energía, tiene un alto desempeño en minimizar variaciones de par pero desde el punto de vista de la extracción no es buena. De acuerdo a las simulaciones, la estrategia de control implementada en el ingenio A no tiene buen desempeño, las

Tabla 1. Índices de desempeño de las diferentes estrategias de control diseñadas para el molino con accionamiento eléctrico

Estrategia	$ISEh$	$ISH\omega$	$ISEm_{med}$	$E_c$	$\bar{x}$	$\sigma$
Cascada $h - \omega - m_{med}$ 5S fmm	8.35	2.81e-6	7.41e-6	274	0.235	0.20
Cascada $h - \omega - m_{med}$ 10S fmm	6.08	0.0014	0.18	268.9	0.237	0.118
Cascada $h - \omega$ 5S fmm	7.22	3.13e-3	-	277.9	0.235	0.245
Cascada $h - \omega$ 10S fmm	4.98	5.95e-6	-	269.7	0.237	0.13
Control selectivo 5S fmm	10.65	1.45	2.14e-6	271.4	0.2368	0.1406
Control selectivo 10S fmm	8.04	0.6695	9.2e-7	268.2	0.2365	0.096
Ingenio A 5S fmm	14.32	3	-	455.6	0.223	0.210

variaciones de par son altas y la extracción baja, y a la vez, tiene un alto consumo de energía.

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo dinámico no lineal del molino de caña de azúcar para ser utilizado en el análisis y desarrollo de estrategias de control. Se diseñaron diferentes estructuras de control simples que fácilmente pueden implementarse en los ingenios con un solo actuador, se evaluaron con índices de desempeño definidos, siendo la estrategia de control cascada  $h - \omega - m_{med}$  la más aconsejada para ser implementada en un molino de caña de azúcar con accionamiento eléctrico. Para mejorar el proceso de molienda se requiere una medición continua de la señal de altura de la tolva, aumentar la capacitancia de la tolva de alimentación, mayor altura del tanque y garantizar flujo de alimentación del bagazo continuo al primer molino.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ingeniero Adolfo Gómez y al programa de procesos de fábrica del Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar (Cenicaña) por su apoyo logístico en las mediciones de campo.

## REFERENCIAS

- Alvarez, J., J. Ramirez and E. Rosero (2008). Modelado del tren de molinos de un ingenio azucarero. In: *XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático, Mérida, Venezuela*.
- Crawford, W. (1959). Reabsorption a limiting factor in mill performance.. In: *Proceedings od the Internat. Soc. of Sugar Cane Technol.*
- Gómez, A., C. Peñaranda, C. Vélez and J. Ortiz (2005). An approach to a relationship between roll shell wear and pol extraction. In: *Proceedings od the Internat. Soc. of Sugar Cane Technol.*
- Hugot, E. (1986). *Handbook of cane sugar engineering*. Elsevier Publishing Company.
- Landau, I. and F. Rolland (1994). System identification, robust control and adaptation: A methodology for process control. Francia. Technical report. Laboratoire d'Automatique de Grenoble and GR Automatique.
- Leonhard, W. (2001). *Control of electrical drives*. Springer.
- Loughran, J. C. (1990). Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane. PhD thesis. University of Queensland.
- Murry, C. and Holt (1967). *The mechanics of crushing sugar cane*. Elsevier Publishing Company.
- Ozkocak, T., F. Minyue and G. Goodwin (1998). A nonlinear modelling approach to the sugar cane crushing process.. In: *Proceedings on the 37th IEEE Conference on Decisión & Control, Tampa, Florida, USA*.
- Ozkocak, T., F. Minyue and G. Goodwin (2000). Maceration control of a sugar cane crushing mill. In: *Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, USA*.
- Partanen, A. G. (1995). The application of an iterative identification and controller design to a sugar cane crushing mill. **31**(11), 1547–1563.
- Rosero, E. (2006). *Modelado y control de un molino de caña de azúcar. Tesis de Maestría*. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Rosero, E., J. Ramirez and A. Gómez (2008). Evaluación del desempeño dinámico y la eficiencia energética en molinos de caña de azúcar con accionamientos térmicos y eléctricos. **16**, 25–32.
- West, M. (1997). *Modelling and control of a sugar cane crushing mill. Master Thesis*. University of Newcastle New South Wales, Australia.