

Simulación de un algoritmo para controlar el nivel en tolva ante alimentación discontinua de caña

Fabricio Garelli* Mercedes Ramírez M.** Ariel Domínguez C.*** Modesto Angulo A. ***

*LEICI, Departamento de Electrotecnia, Universidad Nacional de La Plata,
C.C.91 (1900), La Plata, Argentina (fabricio@ing.unlp.edu.ar)

**Departamento de Control Automático, Ingeniería Eléctrica, Universidad de
Oriente, Santiago de Cuba, Cuba (mramirez@fie.uo.edu.cu)

***Departamento de Electroenergética, Ingeniería Eléctrica, Universidad de
Oriente, Santiago de Cuba, Cuba (arield@fie.uo.edu.cu y angulo@fie.uo.edu.cu)

Resumen: Los actuales métodos de control del transporte y preparación de la materia prima provocan graves problemas de discontinuidad en la alimentación al tren de molinos de caña en la industria azucarera en Cuba. La introducción masiva de la tecnología de convertidores de frecuencia para el control de velocidad de motores asincrónicos permite proponer la utilización de la velocidad de las esteras como variable manipulada para el control del nivel de la tolva. Este trabajo presenta una variante de control por velocidad considerando la altura del colchón de caña en la estera elevadora como una perturbación multiplicativa a la entrada de la planta. Se propone un algoritmo de adaptación de set-point por modo deslizante para limitar los transitorios en el nivel de caña en tolva provocados por las fluctuaciones en la alimentación de caña. El método propuesto requiere realimentar únicamente variables accesibles y es robusto ante cambios en la densidad de caña y/o ruido de medición. Su implementación es extremadamente sencilla para lazos de control por velocidad tipo PID. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: molienda de caña de azúcar, estera transportadora, molinos de caña, control PID, control de velocidad, modo deslizante, set-point adaptivo.

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de azúcar y sus derivados, reviste especial importancia la adecuada preparación de la caña para la alimentación de la planta moledora, lo cual incluye un procesamiento mecánico previo y la garantía de un suministro estable a los molinos. Una variable esencial para lograr elevados índices de eficiencia industrial es el nivel en la tolva de alimentación o dosificador al primer molino.

La figura 1 presenta un esquema de las distintas etapas en la preparación de la caña. En la inmensa mayoría de las fábricas de azúcar de Cuba, el esquema tecnológico del proceso de preparación de caña, incluye como mínimo, dos o tres transportadores o esteras, en las cuales se realizan varios pasos de preparación mecánica tales como separación de partículas metálicas, corte, desmenuzamiento y nivelación de la masa cañera precedente de los campos de cultivo. El concepto moderno de preparación pretende "romper" en la caña la mayor cantidad posible de las celdas de jugo para facilitar la extracción posterior por compresión y lavado.

Finalmente, la caña preparada es elevada y descargada mediante una de las esteras, para tratar de mantener un determinado nivel de llenado de la tolva alimentadora, donde se acumula para alimentar por gravedad al primer elemento del tren de molinos, según las necesidades de procesamiento. En algunos centrales azucareros, el proceso consta de solamente dos esteras transportadoras, la alimentadora o surtidora y la elevadora, en otros entre la alimentadora y la elevadora existe una estera intermedia.

Figura 1. Etapas en la alimentación de caña a los molinos.

Los procesos mecánicos de preparación se realizan normalmente en el tramo inicial de la estera intermedia o de la elevadora, buscando obtener así un denominado colchón de caña, con la misma troceada y desfibrada ("rota") lo más homogéneamente posible para alimentar a los molinos. Por regla general, en la primera estera (donde se recibe la materia prima), no se realiza un control de la velocidad de la misma sino frecuentes arranque y paradas del motor en dependencia de la cantidad de caña alimentada y el flujo demandado por la siguiente estera. Cuando existe estera intermedia, en esta se mantiene la velocidad constante y se realizan las acciones mecánicas sobre la caña. Es en la estera elevadora (que suministra la caña a la tolva de alimentación), donde generalmente se utiliza un accionamiento de velocidad variable para tratar de controlar el nivel de la tolva de

alimentación. Este control se realiza aún en muchos casos con el obsoleto método de introducir resistencias externas en el circuito de rotor de motores asincrónicos de rotor bobinado, lo cual se traduce en una baja eficiencia energética y un control a saltos de la velocidad de la estera. En otros casos se utiliza un motor hidráulico para el accionamiento de la estera, que incluye una doble transformación de energía y por ende una disminución de la eficiencia.

Es evidente que en el estado actual de estos procesos industriales no es posible lograr una adecuada alimentación al tren de molinos, en cuanto a continuidad y calidad de preparación de la masa cañera. Con este fin se abordará aquí el modelado de los componentes principales y el estudio de una alternativa para el control de nivel de caña en la tolva mediante la velocidad de la estera elevadora.

2. CASO DE ESTUDIO Y MODELOS INVOLUCRADOS

La propuesta del sistema de control ha sido simulada para su validación a partir de las características, configuración y parámetros del central azucarero "B. Massó" en la provincia Granma, Cuba. En éste la configuración de la planta de preparación de caña coincide con la de la figura 1, es decir una estera receptora de materia prima o surtidora, una estera intermedia que incluye los procesos de nivelación y primer juego de cuchillas y una estera elevadora (con el mecanismo de la desfibradora) para la alimentación de la tolva. Algunos de los parámetros correspondientes a las esteras de este ingenio se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de las esteras del Ingenio B. Massó.

Denominación del parámetro	UM	Surtidora	Elevadora
Capacidad de molida diaria	[T/día]	6803	6803
Longitud del conductor (estera)	[m]	47.38	40.27
Longitud del tramo horizontal	[m]	35.7	10
Longitud del tramo inclinado	[m]	11.68	30.27
Ángulo del tramo inclinado	[°]	13	21
Ancho efectivo del colchón	[m]	2.12	2.12
Altura de cálculo del colchón	[m]	2	1.6
Velocidad media de operación	[m/s]	0.25	0.12
Velocidad máxima de operación	[m/s]	0.25	0.25
Peso específico de la caña (con máxima compactación)	[kg/m³]	400	487.5

Los factores combinados que determinan la calidad del proceso de alimentación continua a la tolva son la altura del colchón de caña en la estera elevadora y la velocidad mínima posible de la estera. Aunque teóricamente, la tasa de molienda especificada o definida en el ingenio determina la velocidad media; actualmente, bien porque el equipo motriz de la estera no lo permite o porque el control no es automatizado, se trabaja en forma de pulsos y se usa una velocidad muy superior a la media, con lo cual disminuye el índice de preparación (lo cual provoca bajos niveles de Brix), aún con una buena altura del colchón, y se produce además el desbordamiento de la caña en la tolva que obliga a detener el proceso.

En el presente trabajo se realiza el estudio del lazo de control del nivel de caña en la tolva de alimentación, con el fin de determinar si es factible técnicamente la aplicación al problema en cuestión de una propuesta reciente de control por medio de adaptación de la señal de referencia (Garelli *et al.*, 2006, 2007).

Se propone en un principio implementar un sistema de control donde será manipulada la velocidad de la estera elevadora, con el objetivo de controlar el nivel de llenado de la tolva a través de acciones de control PID, las cuales gozan de gran aceptación en la industria. Estos esquemas basan su realización en el uso de convertidores de frecuencia para el control de la velocidad de las esteras, incluyendo la sustitución de los motores de rotor bobinado por motores de jaula de ardilla, con lo cual se hace posible la variación de la velocidad de estos accionamientos en un amplio rango, el cual puede ser desde valores cercano a cero (dependiendo del tipo de convertidor) hasta valores por encima de la velocidad nominal del motor. El uso de los convertidores tiene un impacto positivo en la elevación de la eficiencia energética por la minimización de las pérdidas en los motores.

Adicionalmente, se propone incorporar un lazo externo que realmente además del nivel de caña en tolva, la altura del colchón en la estera elevadora y la velocidad de la misma. La idea esencial de este esquema es generar una señal de referencia al lazo de control PID que evite que la altura en la tolva se escape del rango deseado como consecuencia de las fluctuaciones del nivel de caña en la estera elevadora.

Para medir nivel en la estera elevadora se recomienda el empleo de un palpador, es decir, un elemento metálico de peso determinado con un grado de libertad en contacto con la caña de la estera, acoplado al cursor de un potenciómetro lineal polarizado, cuya salida es proporcional a la altura del colchón de caña. En el dosificador se propone el uso de un captador ultrasónico. El principio de funcionamiento del mismo está basado en calcular la distancia a la que se encuentra el sólido mediante rayos ultrasónicos, los cuales al ser recibidos por el captador son convertidos en una señal eléctrica. Para su correcto funcionamiento el mismo debe ser colocado de forma vertical en la parte superior de la tolva.

2.1 Modelos considerados

Por lo anterior, el **modelado de los captadores** se reduce a la consideración de los mismos como elementos lineales de ganancia determinada sin retraso.

Modelado de los accionamientos: El elemento de acción final en el lazo de control es el accionamiento eléctrico, en este caso formado por el sistema convertidor de frecuencia-motor de inducción, para el cual se elige como modelo un elemento lineal de primer orden, dadas las pequeñas constantes de tiempo electromagnéticas del convertidor y el motor con respecto a la inercia mecánica del motor y el reductor (Angulo and Domínguez, 2005, 2006). Los parámetros de los bloques han sido determinados a partir del conocimiento de los datos de los motores y de los convertidores de frecuencia recomendados para la instalación en el caso del central azucarero B. Massó, siendo de esta manera el accionamiento representado por la siguiente función de transferencia:

$$M(s) = \frac{0,124}{0,014 \cdot s + 1} \quad (1)$$

El **modelado de las esteras** o transportadores (Gorostiaga *et al.*, 2000; Ramirez *et al.*, 2007; Sena *et al.*, 2007), permite obtener el flujo de salida de la estera en función de la velocidad de la misma y el flujo másico de entrada.

Las esteras transportadoras con paredes laterales para sólidos, poseen una determinada capacidad volumétrica, para realizar el modelado del flujo y el espesor del colchón de caña, se tuvieron en cuenta las siguientes restricciones: el sólido transportado tiene una altura o nivel uniforme en la sección transversal de la estera, la densidad del sólido transportado es constante, el grado de inclinación de los tramos inclinados de ambas esteras no es tan grande como para producir un deslizamiento del colchón de caña de sentido contrario al movimiento de la estera y la afectación de los mecanismos de preparación sobre la dinámica del flujo es despreciable.

El transportador de estera puede verse como un sistema de parámetros distribuidos con dos variables de entrada (flujo de sólido a su entrada y velocidad de la estera) y dos de salida (flujo de sólido y nivel o altura a su salida), tal como se aprecia en la figura 2.

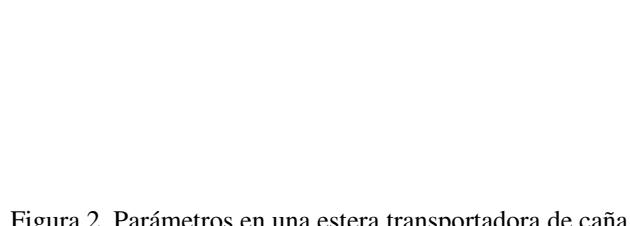


Figura 2. Parámetros en una estera transportadora de caña.

El caudal o flujo en cualquier punto de la estera se calcula mediante:

$$F(t, z) = A_e \cdot N_e(t, z) \cdot v_e(t) \cdot \rho_e, \quad (2)$$

donde:

A_e : ancho de la estera (m)

$N_e(t, z)$: altura o espesor del colchón (m)

$v_e(t)$: velocidad de la estera (m/min)

ρ_e : densidad del colchón de caña en estera elevadora (Kg/m^3)

En particular, nos interesaría el flujo de salida de la estera elevadora F_s^e ya que coincide con el flujo de entrada a la tolva F :

$$F_s^e = F(t, L) = F_e, \quad (3)$$

con lo cual el palpador deberá ubicarse en el tramo final de la estera a fin de sensar el nivel de colchón $N_e(t, L)$.

Modelado de la tolva. El modelo del dosificador depende de la forma y dimensiones (Gorostiaga *et al.*, 2000). Se considera una tolva de sección rectangular constante con altura R , ancho A y profundidad P . La ecuación de balance de masa en la tolva es la siguiente:

$$\frac{dm}{dt} = F_e - F_s = F_N \quad (4)$$

El flujo de caña absorbido por el primer equipo de molienda puede calcularse por:

$$F_s = A \cdot H \cdot \gamma(t) \cdot w_m \quad (5)$$

La velocidad tangencial de las masas del molino (w_m) es constante debido a que son operadas a velocidad constante.

El ancho de las masas (A), obviamente, es también constante e igual al ancho de la tolva. Por el contrario, ni el espesor del colchón de caña entre las masas H (la separación entre la masa superior y la masa cañera) ni la densidad del colchón en ese punto (γ) son constantes para todo el espacio de operación posible. Ambas dependen en forma no lineal de la altura o nivel del colchón en la tolva y de la presión aplicada a los molinos. Sin embargo, si el nivel del colchón de caña en la tolva se mantiene entre un 40 y un 80 % de la altura máxima de la tolva la flotación H puede considerarse prácticamente constante en ese intervalo.

A los fines del modelado, para calcular la masa de caña en la tolva se determina una densidad promedio en tolva ρ_0 correspondiente a una altura en tolva del 60% de la altura máxima R , y se considera a las variaciones de ρ (densidad media en tolva) con la altura como incertidumbre del modelo (Δ). Así:

$$m(t) = A \cdot P \cdot N_T(t) \cdot \rho_0, \quad (6)$$

donde:

A : ancho de la tolva (m)

P : profundidad de la tolva (m).

N_T : altura del colchón de caña en la tolva (m)

Finalmente, el modelo de la tolva queda determinado en el dominio del tiempo por:

$$\dot{N}_T = \frac{1}{A \cdot P \cdot \rho_0} (F_e(t) - A \cdot H \cdot \gamma(t) \cdot w_m) \quad (7)$$

El dosificador o tolva de alimentación es modelado como un integrador, cuya variable de salida (nivel de caña en tolva), depende de la integración del flujo de entrada. Para el caso del ingenio B. Massó, la constante de integración resulta $1/AP\rho_0 = 0.0019 \text{ m/kg}$.

3. SISTEMA DE CONTROL

3.1 Introducción a los regímenes deslizantes

Un sistema de estructura variable se compone de dos o más subsistemas continuos y una lógica que realiza la comutación entre ellos en función de los estados del sistema. La acción de control que resulta de esta ley de comutación es una función discontinua de los estados. Un modo de operación particular se obtiene cuando las comutaciones ocurren a frecuencia muy elevada, restringiendo la trayectoria de los estados del sistema a una variedad en el espacio de estados. Este modo de operación es llamado modo o régimen deslizante, y presenta propiedades muy atractivas. Entre otras, es robusto a perturbaciones externas y a incertidumbre en los parámetros, el sistema de lazo cerrado es de orden reducido, y su dinámica es gobernada mediante el diseño de la función de comutación (Edwards and Spurgeon, 1998; Sira-Ramirez, 1989).

Considérese el siguiente sistema continuo:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (8)$$

donde $x \in X \subset \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u \in \mathbb{R}$ es la acción de control (posiblemente discontinua), $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ y $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ dos campos vectoriales en C^n (infinitamente derivables) y $h(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ campo escalar también en C^n , todos definidos en X , con $g(x) \neq 0, \forall x \in X$. Estos sistemas reciben el nombre de sistemas afines en el control.

Si se define la función de conmutación $s(x)$ como una función suave $s: X \rightarrow \mathbb{R}$, cuyo gradiente ∇s es no nulo en X , entonces el conjunto $S = \{x \in X : s(x) = 0\}$ define una variedad regular en X de dimensión $(n-1)$, llamada variedad de deslizamiento o superficie de conmutación.

Se puede plantear una ley de control de estructura variable imponiendo que la acción de control u tome un valor de entre dos posibles, según sea el signo de la función de conmutación $s(x)$:

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{si } s(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{si } s(x) < 0 \end{cases}, \quad u^+(x) \neq u^-(x) \quad (9)$$

Los niveles superior e inferior de u son funciones suaves de x y, sin pérdida de generalidad, se puede aceptar que satisfacen $u^+(x) > u^-(x)$. Nótese que si $u^+ > u^-$ para algún $x \in X$, esta desigualdad valdrá $\forall x \in X$ ya que u^+ y u^- son ambas funciones suaves y nunca se igualan.

Se dice que existe un régimen deslizante sobre S cuando, como resultado de la ley de conmutación (9), el sistema alcanza la superficie S y se mantiene localmente en su entorno.

Para la existencia de un régimen deslizante sobre S debe cumplirse que los campos vectoriales controlados de los dos subsistemas continuos, $(f + g u^+)$ y $(f + g u^-)$, apunten localmente hacia la variedad S . Esta situación se representa geométricamente en la figura 3.

Matemáticamente, la función de conmutación debe cumplir con las siguientes desigualdades localmente en el entorno de S :

$$\begin{cases} \dot{s}(x) < 0 & \text{si } s(x) > 0 \\ \dot{s}(x) > 0 & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Figura 3: Establecimiento de régimen deslizante sobre la superficie $s(x)=0$.

Como consecuencia de (10), el sistema alcanza la variedad de deslizamiento S y de ahí en adelante queda confinado en el entorno de S . Se dice entonces que existe un régimen deslizante sobre S .

Luego, una condición necesaria para el establecimiento del modo deslizante es que la función de conmutación $s(x)$ tenga grado relativo unitario respecto a la acción discontinua, de forma tal que mediante la ley de control (9) pueda garantizarse (10). Esta condición se conoce en la literatura como *condición de transversalidad* (Utkin *et al.*, 1999).

3.2 Esquema de compensación propuesto

A diferencia del control por modo deslizante convencional, la estrategia aquí propuesta explota los regímenes deslizantes como un modo transitorio de operación. El objetivo es adaptar la señal de referencia por medio de una señal auxiliar discontinua para limitar las variaciones en el nivel en tolva producidas por la alimentación fluctuante de caña.

El esquema de control propuesto para el caso en estudio se muestra en la Fig. 4. En ella se pueden distinguir un lazo principal de control PID y la realimentación de determinadas variables de interés hacia un microcontrolador o PC a la entrada del sistema de control. Por otro lado, puede observarse que la altura o nivel en la estera elevadora $N_e(t, L)$, que varía fuertemente producto de la alimentación discontinua de caña, actúa como una perturbación multiplicativa de entrada en el lazo de control.

Figura 4. Diagrama de bloques del esquema de control propuesto.

El lazo de control PID puede sintonizarse con cualquiera de los métodos convencionales utilizados en la industria para tal fin, o en caso de considerarse algún otro ingenio azucarero, tratarse de un control PID ya existente. Una alternativa para su implementación sería utilizar un controlador industrial de tipo SIPART DR20, que es un PID modular programable. El mismo puede ser conectado a través de una interfase serie a sistemas jerárquicos (computadora de procesos o sistemas de mando) o incluido en un sistema central de supervisión.

El propósito del lazo externo adicionado en la etapa de baja potencia con un microcontrolador es el de adaptar la señal de set-point para limitar las excursiones del nivel en tolva que produce la severa fluctuación (pero no interrupción) en la alimentación de caña de azúcar. Este esquema se basa en ideas de algoritmos recientemente propuestos para mejorar el desacoplamiento de sistemas multivariados mediante el acondicionamiento del vector de referencias (Garelli *et al.*, 2006, 2007).

Con este fin, en el microcontrolador se programa la siguiente lógica de conmutación para la señal auxiliar $a(t)$:

$$a(t) = \begin{cases} r & \text{si } s_{inf}(t) > 0 \\ -r & \text{si } s_{sup}(t) < 0 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (11)$$

siendo las funciones de conmutación de protección:

$$s_{inf}(t) = N_{Tmin} - N_T - \tau F_N \quad (12)$$

$$s_{sup}(t) = N_{Tmax} - N_T - \tau F_N \quad (13)$$

con N_{Tmin} y N_{Tmax} límite inferior y superior (respectivamente) para N_T y τ constante escalar.

La señal discontinua auxiliar $a(t)$ se adiciona al nivel de set-point deseado y luego es suavizada mediante un filtro de primer orden para generar la señal de referencia adaptada r_f . El algoritmo implementado en el microcontrolador o PC se representa mediante diagramas de bloques del entorno Matlab-Simulink® en la Figura 5.

Este método de compensación puede ser interpretado como el acondicionamiento por modo deslizante del set-point de nivel en tolva. En efecto, si se considera por un momento $\tau=0$, de acuerdo a la lógica (11) y las funciones de conmutación (12)-(13) se puede observar que cuando el nivel de caña en tolva N_T se mantiene dentro del rango deseado ($N_{Tmin} < N_T < N_{Tmax}$) la señal $a(t)$ es cero y no se efectúa corrección alguna sobre el set-point original r . Sin embargo, si N_T intenta superar su valor máximo permitido ($s_{sup}(t) < 0$) la señal $a(t)$ cambia a $-r$. Análogamente, si por alguna causa N_T alcanza su límite inferior ($s_{inf}(t) > 0$), $a(t)$ comuta a $+r$. Mientras el nivel continúa intentando escapar del rango deseado, la señal $a(t)$ permanecerá conmutando entre 0 y $-r$ o $+r$ a alta frecuencia y se establecerá un régimen deslizante sobre la superficie $s_{sup}(t)=0$ o $s_{inf}(t)=0$ [9]. De esta manera, la referencia filtrada r_f será acondicionada continuamente para evitar que N_T exceda los límites establecidos. Así, el algoritmo de adaptación de la referencia explota las propiedades del régimen deslizante como un modo transitorio de operación.

Observar que para $\tau \neq 0$ el análisis anterior es igualmente válido, con la salvedad de que, además de la amplitud, la velocidad con que N_T se aproxima al límite es tenida en

Figura 5. Diagrama de bloques representativo de las operaciones realizadas por el microcontrolador o PC.

cuenta para decidir la conmutación (de (4), (5) y (7) se observa fácilmente que la derivada de N_T está dada por el producto entre F_N y la constante de integración). Si se considera como ejemplo el límite superior, durante el régimen deslizante se verificará la condición de invarianza y por tanto $s_{sup}(t)=0$. Luego, de (13) se tiene que durante la adaptación de set-point

$$\dot{N}_T = \frac{1}{\tau \cdot AP\rho_0} (N_{Tmax} - N_T), \quad (14).$$

es decir, que mediante la constante escalar τ se puede fijar el autovalor que determina la dinámica con que N_T tiende a su valor límite. A menores valores de τ mayor será la velocidad con que N_T alcanza su límite. Observar además en (14) que esta dinámica es independiente del nivel de colchón en la estera N_e , y que si bien la incertidumbre en la densidad en tolva ($\rho(t)=\rho_0 \pm \Delta$) afecta la dinámica de alcance la misma no modifica el valor límite al que tiende el modo deslizante.

Es importante remarcar que si bien para el establecimiento del modo deslizante las funciones de conmutación deben tener grado relativo unitario respecto a la acción discontinua (*condición de transversalidad*), en este caso se despreció la dinámica del accionamiento ya que además de ser mucho más rápida que la del proceso simplifica el diseño del algoritmo de adaptación. En aquellos casos en que la dinámica del accionamiento sea comparable con la del resto del sistema, se deberá incluir un estado adicional en las funciones de conmutación o bien aprovechar la dinámica del accionamiento como filtro de la señal discontinua (en lugar del filtro de primer orden digital).

Una característica distintiva de esta propuesta es que a diferencia de otras aplicaciones, en las cuales la implementación del lazo de acondicionamiento de la referencia implica tener que derivar señales con ruido de medición (típicamente las salidas del sistema), en este caso requiere únicamente realinear el nivel de colchón en la estera transportadora y la velocidad de la misma, ambas variables perfectamente accesibles.

Por otro lado, si bien en la Fig. 4 el control PID y la adaptación del set-point se presentan como dos lazos diferentes a fin de ilustrar que se preserva la estructura PID altamente aceptada en la industria, las dos funciones pueden implementarse fácilmente en forma conjunta, ya sea digitalmente con un único microcontrolador, o bien por medio de sencillos circuitos de electrónica analógica.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de evaluar la estrategia propuesta, se sintonizaron distintos controladores PID en el lazo principal de control. Cabe destacar que si bien no se trabajó en vistas a optimizar la sintonización de los controladores PID de nivel, el lazo de adaptación de set-point propuesto es independiente del controlador PI o PID utilizado.

Para ilustrar el desempeño de la metodología propuesta, se consideró en primer lugar ruido de medición nulo y se tomaron ganancias del PID $k_P=200$, $k_I=5$ y $k_D=0$ de manera de obtener respuestas rápidas para las dimensiones y los parámetros involucrados en el Ingenio B. Massó. A su vez, se simularon variaciones bruscas (tipo onda cuadrada) en el nivel de colchón de caña en la estera elevadora para evaluar la respuesta del sistema bajo condiciones demandantes. La figura 6 muestra en línea punteada los resultados de simulación del control PID convencional. Puede observarse que el nivel en tolva N_T se ve transitoriamente afectado por las variaciones en la estera elevadora N_e . Aún así, bajo las condiciones mencionadas el lazo cerrado convencional logra rechazar la perturbación y restablecer el nivel deseado, verificándose que el empleo de accionamientos adecuados que permitan utilizar la velocidad de la estera como acción de control de un lazo cerrado permitiría mejorar notoriamente la eficiencia del central.

Las variaciones de N_T provocadas por la alimentación irregular de caña en el lazo de control convencional pueden acotarse mediante la implementación del set-point adaptivo propuesto. La efectividad del método se observa en línea continua en la figura 6, donde también se muestran los valores límites máximos y mínimos (línea a rayas y puntos) seteados en el microprocesador de la fig. 4. Puede apreciarse que los transitorios ocasionados por las fluctuaciones en la altura del colchón de la estera elevadora son efectivamente limitados en amplitud y forzados a permanecer en el rango de valores deseados. Se tomó $\tau=0.1$, con el objetivo de que N_T tienda rápidamente a su valor límite.

La figura 7 presenta la velocidad de la estera elevador v_e , el set-point acondicionado r_f y la señal auxiliar discontinua $a(t)$ correspondientes a la figura 6. En ella se puede apreciar: (a) cómo la velocidad de la estera varía dentro de los valores nominales y en forma suave (v_e fue graficada en m/min, y su rango de variación coincide para los casos con y sin adaptación de set-point), (b) que la señal de entrada al lazo principal de control es suave y difiere de la original únicamente cuando N_T intenta superar los límites impuestos, y (c) que la señal auxiliar comuta a alta frecuencia en un sentido o en otro dependiendo si se alcanza el límite inferior o superior de la variable controlada.

Por su parte, la figura 8 muestra las respuestas sin (línea punteada) y con (línea continua) adaptación de set-point para un caso más realista en el cual se considera el ruido de medición proveniente de los captadores y un control PI de menor ancho de banda con diseño tipo *quarter decay* para el rechazo a perturbaciones ($k_P=50$, $k_I=5$). Se evidencia también en este caso la fuerte reducción en la excursión de N_T ante las variaciones de nivel en la estera elevadora.

Finalmente, la figura 9 muestra el efecto de las variaciones en la densidad de caña $\rho(t)$ sobre la dinámica con que N_T se aproxima a su límite, y la robustez del límite impuesto frente

a estos cambios. En efecto, la figura reproduce el transitorio de la figura 6 en $t=600$ s afectada por ruido de medición y considerando variaciones en la densidad ρ de $\pm\Delta=50\%$, pero con $\tau=10$ para que se aprecie la dinámica de alcance. Cabe destacar que, de acuerdo a los ensayos experimentales reportados en West (2007) -ver figura 2.8 de esta referencia-, la incertidumbre considerada abarca toda la variación posible de ρ producida por los cambios de altura N_T (y podría a su vez representar la incertidumbre en otros parámetros del sistema). Como se puede observar en la figura 9, a menor densidad de caña mayor es la velocidad de aproximación -lo que se corresponde con (14)-, mientras que los límites impuestos se mantienen inalterados (en el segundo caso no se alcanza el límite ya que el sistema vuelve a la región permitida antes de que se extinga el transitorio impuesto por τ y ρ).

Figura 6. Respuesta del sistema con controlador PI ante alimentación discontinua. Sin (línea punteada) y con (línea continua) adaptación de set-point.

5. CONCLUSIONES

Se realizó una propuesta de adaptación de set-point para evitar que la altura en la tolva se escape del rango deseado como consecuencia de las fluctuaciones del nivel de caña en la estera elevadora. El método propuesto define funciones de conmutación de protección, las cuales dan lugar a modos deslizantes transitorios con el fin acotar las variaciones en el nivel de caña en tolva. Esta limitación es robusta ante ruido de medición o incertidumbre en los parámetros, como es el caso de la densidad media de caña en la tolva. Los resultados de la simulación muestran que el método puede ser agregado a lazos de control por velocidad previamente diseñados, ya que en efecto su operación es independiente de la del lazo principal de control.

Como trabajo futuro, para su implementación en los centrales azucareros cubanos se deberán sustituir los accionamientos tradicionales de los transportadores de caña por convertidores de frecuencia y motores de jaula. La implementación de estos resultados en la industria azucarera cubana permitirá una elevación de la calidad y eficiencia industrial, con un considerable impacto económico por reducción de pérdidas energéticas y aumento de la productividad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del CONICET (PIP112-200801-0), la UNLP y de la red AUTRANSCAÑA, perteneciente al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

REFERENCIAS

Figura 7. Velocidad de la estera, set-point acondicionado, y señal auxiliar discontinua correspondientes a la Fig.6.

Figura 8. Restricción en la excusión de nivel en tolva con controlador PI para rechazo a perturbaciones y en presencia de ruido de medición.

Figura 9. Efecto de las variaciones en la densidad de caña sobre la dinámica de alcance al valor límite $N_{T\max}$.

- Angulo M., Domínguez A. (2005.), Modelo generalizado para el estudio del motor de Inducción. *Revista Energética*, La Habana, **1**, s/n.
- Angulo M., Domínguez A. (2006) Simulación del control de velocidad de un motor asincrónico por campo orientado con ahorro de energía. *Ciencia en su PC*, **9**, s/n.
- Edwards C. y Spurgeon. S. K. (1998). *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. Taylor & Francis, UK, 1ra edición.
- Garelli F., Mantz R.J. y De Battista H. (2006). Limiting interactions in decentralized control of MIMO systems. *Journal of Process Control*, Elsevier, **16**, 473-483.
- Garelli F., Mantz R.J. y De Battista H. (2007). Sliding mode compensation to preserve dynamic decoupling of stable systems. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, **62**, 4705-4716.
- Gorostiaga L, De Prada C, Acebes L. F (2000). Dinámica de esteras transportadoras de caña. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, **21**, No. 2., pp.92-96.
- Ramírez M, Angulo M, Domínguez A, Albertos P. (2007). Speed control of sugar cane belt conveyor with fuzzy controller. *Research in Computing Science*, Special issue: Industrial Informatics, **31**, pp. 73-83.
- Sena de O. F, De Souza R, De Lima M. (2007), Validacao de modelo computacional de um transportador de correia e implementacao de um sistema para ralocacao de energia a través da frenagem regenerativa. *XIX SNPTEE proceedings*, GCE 22, Rio de Janeiro.
- Sira-Ramirez, H. (1989). Sliding regimes in general non-linear systems: a relative degree approach. *International Journal of Control*, **50**:1487–1506.
- Utkin, V., Guldner, J., Shi, J., (1999). *Sliding mode control in electromechanical systems*. First ed. Taylor & Francis, London.
- West, M. (1997). *Modelling and control of a sugar crushing station*. Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, Australia.