

Modelado de Control de Nivel en Molde para Vaciado Continuo de Palanquillas de Acero

Guillermo González Yero^{a,*}, Mercedes Ramírez Mendoza^b, Boris Luis Rustán Téllez^c

^a Grupo de Automatización, Empresa Acinox Las Tunas, Circunvalante Norte Km 3½, Las Tunas, Cuba.

^b Departamento de Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Ave. de Las Américas, Santiago de Cuba, Cuba.

^c Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Ave. de Las Américas, Santiago de Cuba, Cuba.

Resumen

Este trabajo presenta un modelo del sistema de control de nivel en molde de una máquina de vaciado continuo de palanquillas de acero. El objetivo fue realizar el modelado de cada elemento del sistema incluyendo las perturbaciones y transformaciones de la planta que más afectan la calidad del control. Se obtuvo y validó un modelo aproximado, utilizando leyes físicas, la identificación experimental mediante señales especiales e identificación paramétrica fuera de línea. En el modelo se incluyen de forma explícita los fenómenos de obstrucción y erosión en la válvula, que tienen una incidencia significativa en el funcionamiento de la planta. Para el servosistema hidráulico de la instalación se logró un modelo de caja gris que contribuye a un mejor entendimiento del comportamiento del proceso y a evaluar la incidencia de una implementación multifrecuencia bajo esquema convencional. Con el modelo obtenido es posible estudiar la operación del sistema a escala de simulación y la efectividad de soluciones de control avanzadas. El trabajo desarrollado es parte de un proceso de I+D que en el transcurso de más de 10 años ha contribuido a que en la acería donde se realiza la investigación, exista un sistema de control de nivel en molde que tiene impacto positivo sobre la calidad del acero producido. Copyright © 2014 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Modelado, industria del acero, control de nivel

1. Introducción

En las últimas décadas la automatización industrial ha estado sometida a cambios mucho más rápidos que en cualquier otro momento en su historia. En el campo del procesamiento de metales y minerales se han experimentado continuos cambios en el control de los procesos, que responden a las crecientes exigencias del desarrollo tecnológico (S.-L. Jämsä-Jounela, 2001). En la producción de acero con vaciado continuo en particular, se desarrollan investigaciones sobre el control del nivel en los moldes, por la consecuente repercusión en la calidad y eficiencia desde el punto de vista metalúrgico.

El control de nivel en molde constituye un ejemplo de aplicación industrial citado en textos de diseño de sistemas de control (Goodwin et al., 2000) y posiblemente, desde la perspectiva de la comunidad de control automático, sea el problema de control más famoso en el vaciado continuo (Craig et al., 2001).

En el libro Control Design (Goodwin et al., 2000) se escoge este proceso para esbozar diferentes estrategias de control. Se

plantea que para el diseño de un controlador es muy necesario el modelado; por tal razón, se propone un modelo basado en las leyes de la Física y se añade que estimar un modelo más exacto de este tipo de proceso constituye un gran reto. Sin embargo, la repercusión metalúrgica e impacto económico de optimizar el control de nivel en molde de vaciado continuo, impone la necesidad de perfeccionar los modelos para evaluar y validar a escala de simulación soluciones de control superiores.

El presente trabajo pretende contribuir al modelado del proceso de control de nivel en moldes de vaciado continuo, desarrollándose particularmente en la empresa Acinox Las Tunas de Cuba, la cual está dotada de un laminador de barras y una acería. Esta última tiene las instalaciones necesarias para producir por vaciado continuo 150 000 toneladas con una máquina radial que produce palanquillas con secciones de 0.13x0.13 m², 0.14x0.14 m² y 0.16x0.16 m² y que además puede producir planchones.

A continuación se realiza una descripción detallada del proceso en el apartado 2. En el tercer apartado se presenta una reseña histórica del modelado del proceso, así como los resultados obtenidos y la validación del modelo. Finalmente en el cuarto y último apartado se describen las conclusiones del trabajo realizado.

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: guillermo@acinoxtunas.co.cu (Guillermo González Yero), mramirez@fie.uo.edu.cu (Mercedes Ramírez Mendoza)

2. Descripción de un sistema de control de nivel en molde para vaciado continuo de palanquillas de acero

La producción de acero crudo ha crecido en los últimos años, en el año 2002 se fabricaron en el mundo 904 053 miles de toneladas, cifra que en el 2011 fue de 1 518 299 miles de toneladas. El método de vaciado continuo, el más utilizado en la fabricación del acero, en el 2002 se utilizó para producir el 89.2 % del producto a escala global y se ha generalizado aún más hasta emplearlo en el 2011 para el 94.7 % de la producción total (ASSOCIATION, worldsteel, 2012).

2.1. Vaciado continuo de acero

El proceso de vaciado continuo de acero es la vía más eficiente para solidificar grandes volúmenes de acero y se caracteriza por utilizar moldes donde el flujo de acero líquido que entra recibe un enfriamiento intenso para alcanzar un estado semisólido. Luego de alcanzar ese estado es posible la extracción continua.

Existen muchos tipos de máquinas de vaciado continuo y entre las más importantes están la vertical, curva, horizontal y la de vaciado de láminas (Thomas et al., 2001). Aplicando un análisis simple de balance de masa, se comprende lo esencial del vaciado continuo, donde el comportamiento en el tiempo del nivel en el molde depende de la diferencia entre el flujo de acero líquido que entra y el que sale. De acuerdo a las características de cada máquina de vaciado continuo, el nivel se controla regulando el flujo de entrada, el de salida o ambos.

La instalación de vaciado objeto de estudio es de tipo radial, y puede producir tanto planchones como palanquillas. El presente estudio se refiere a la producción de palanquillas. La misma tiene un principio similar a la mayoría de las máquinas de vaciado continuo (Craig et al., 2001), como se observa en la Figura 1 entre sus partes está un recipiente denominado cazuela con capacidad promedio de 60 ton y en el cual se transporta el acero líquido entre 1 500 °C y 1 600 °C. Este a su vez vierte el material en la artesa que asimila 10 ton y que actúa como reservorio, siendo diseñada para proveer el acero líquido a dos líneas de palanquillas. Es aquí donde se sitúan los complejos mecanismos para el control del flujo de entrada al molde. En el vaciado continuo de palanquillas con secciones pequeñas y requerimientos de calidad medios, usualmente se regula el flujo de salida modificando la velocidad de vaciado. En el presente caso se regula el flujo de entrada actuando sobre una válvula asta – tapón, lo cual contribuye a obtener un acero de alta calidad (Watanabe et al., 1999).

Desde la artesa hasta el molde se protege el flujo de acero líquido de su interacción con el medio utilizando una boquilla sumergida. El molde es de cobre con una longitud de 0.78 m y se encuentra ensamblado en una estructura que permite el enfriamiento primario por una cámara de agua. Para evitar la adherencia del acero solidificado a la pared de cobre, se añade un lubricante por la parte superior y se proveen oscilaciones al molde que además contribuyen a la extracción del acero. Para iniciar el vaciado, el acero líquido se cristaliza en la cabeza de una barra falsa colocada en la parte inferior del molde. Desde el mismo arranque, un sistema de motores y rodillos permiten la extracción con una velocidad de vaciado que corresponde a requerimientos metalúrgicos. Luego de salir del molde, el acero semisólido pasa por una zona de enfriamiento secundario que permite acelerar la solidificación total del producto. En el proceso, luego de separar

la barra falsa de la palanquilla solidificada, esta última se va cortando a la medida solicitada por el cliente.

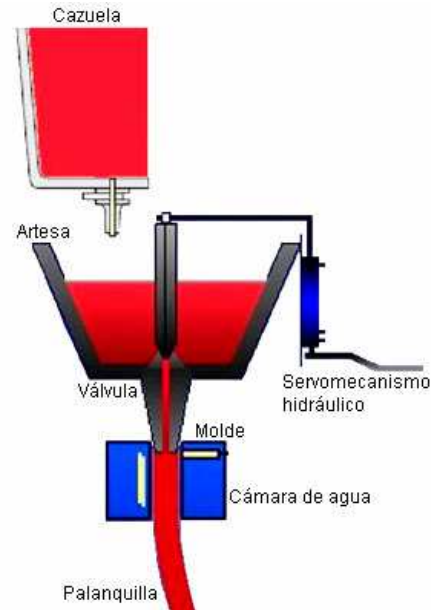


Figura 1: Esquema del proceso de vaciado continuo en molde.

2.2. Control de nivel en molde de vaciado continuo

La automatización en el vaciado continuo puede comprender desde la supervisión y control de las funciones convencionales hasta tareas de aseguramiento de la calidad, planificación y administración de la producción (Craig et al., 2001). Dentro de las tareas de automatización en el vaciado continuo, el control de nivel en molde es difícil y ha sido ampliamente estudiado.

Existen diversas denominaciones para los sistemas de control de nivel en molde, nombrándose comúnmente por el tipo de accionamiento que se utiliza para regular el flujo, así como por el principio de medición del nivel. El sistema de Acinox Las Tunas es del tipo asta-tapón. Como se puede apreciar en la Figura 2, el mismo tiene una configuración de control en cascada. En el lazo interno o de control de posición se mide la posición de la válvula asta-tapón en la artesa, la cual es manipulada por un servomecanismo hidráulico. En el lazo de control externo se mide el nivel del molde y se actúa sobre la referencia de posición para el lazo interno. Los controladores están programados para diferentes tiempos de ejecución en un autómata programable.

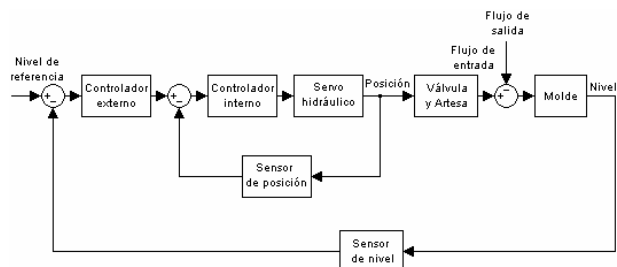


Figura 2: Diagrama en bloques del sistema de control de nivel en molde.

2.3. Situaciones que afectan la calidad del control de nivel en molde de vaciado continuo

Tal como se ha abordado por diferentes investigadores, la complejidad de este tipo de sistema radica en que presenta perturbaciones y dinámicas variantes en el tiempo (Schuurmans, 2011), (Furtmueller and Re, 2008), (Smutný et al., 2005). En la instalación de control de nivel objeto de estudio las principales perturbaciones consideradas son:

1. Variaciones de la velocidad de vaciado por cambios intencionados, por movimiento de la barra falsa, por problemas de alineación y cambios en la fuerza de rozamiento entre los rodillos.
2. Variación del nivel de acero líquido en la artesa.
3. Ruido intrínseco a la medición del nivel.
4. Ruido superpuesto a la medición del nivel por la oscilación relativa entre el molde y el acero líquido.
5. Adición manual de polvo de lubricación al molde.

Las principales transformaciones que puede sufrir el modelo de la planta pueden deberse a:

1. Variación de la curva característica de la válvula por erosión.
2. Variación de la curva característica de la válvula por obstrucción.
3. Adherencia de escoria en la parte superior del asta-tapón.
4. Dificultades en el ensamblaje de la artesa y la válvula asta-tapón.
5. Daños o afectaciones en la artesa como desplazamiento de boquilla, partiduras y otras.

Entre las perturbaciones y transformaciones que afectan al sistema, las más relevantes desde la perspectiva del control son: las variaciones de la velocidad de vaciado y la erosión y obstrucción de la válvula, las cuales ocurren con mayor frecuencia e inciden significativamente en la dinámica del proceso.

3. Modelado de control de nivel en moldes de vaciado continuo

Por los niveles de producción y el valor del acero producido por la vía del vaciado continuo, pequeñas mejoras introducidas al proceso tienen un gran impacto, por lo tanto es un candidato ideal para la optimización y desarrollo usando diversos métodos (Thomas et al., 2002). A la vez para optimizar, evaluar y/o proponer buenas soluciones de control se requiere involucrarse en el diseño de proceso, selección de los sensores, actuadores y en el modelado, con fines de validar los requerimientos de la solución en cuanto a seguridad y rentabilidad antes de su implementación práctica (Goodwin et al., 2000).

3.1. Reseña histórica

Desde hace décadas, los expertos han trabajado la problemática del control de nivel en molde, numerosos han sido los trabajos con nuevas propuestas que tratan de elevar la calidad del control ante las diversas situaciones que la afectan. Algunos de estos trabajos abordan la problemática del modelado como parte de un trabajo más amplio o la tratan de forma exclusiva.

En el trabajo de (Paiuk et al., 1989) se plantea un esquema de una solución de control en la planta SIDERCA de Argentina con producción de palanquillas redondas de diámetro entre 0.14 m y 0.17 m. Allí se realiza un modelado simplificado precisando las principales no linealidades, pero considerando el sistema lineal en

la vecindad de un punto de operación y luego para identificar los parámetros utiliza un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados.

En (Kong et al., 1992) se realizan estudios de identificación y modelado en una máquina CONCAST de vaciado continuo de planchones en una planta de la compañía de acero SIDMAR de Bélgica. Para describir el sistema utiliza modelos paramétricos ARX y realiza la identificación con el paquete de software MATLAB®. El actuador hidráulico lo identifica a lazo cerrado precisando que se trata de un sistema no lineal pero estable, con un modelo discreto del siguiente orden: $n_a=2$, $n_b=1$, $n_k=1$. Para relacionar el flujo de acero con la posición del asta-tapón se valora si el flujo es laminar o turbulento, porque este último caso debe ser representado con ecuaciones diferenciales no lineales. Sin embargo, como los cambios en las variables son pequeños, el sistema puede asumirse lineal. En el mismo artículo se identifica la relación entre el nivel en molde y la posición del asta-tapón a lazo cerrado, empleando una señal excitadora del tipo escalón en el valor deseado.

En (Kong and Keyser, 1993) se hace la identificación planteando en su modelo que la función del nivel en molde depende del flujo de entrada y de la velocidad de vaciado, por lo tanto, también de la posición del asta-tapón y del nivel en la artesa. En el trabajo se realizan experimentos a lazo abierto para identificar la relación entre el nivel en el molde y la posición del asta-tapón, obteniendo un resultado muy similar al del experimento a lazo cerrado. Posteriormente, (Keyser, 1997) describe que durante la operación de este tipo de sistema la ganancia puede experimentar fuertes variaciones.

En el artículo de (Asano, 1994) se describe una patente para método de control y dispositivo para vaciado continuo en el que se incluye la identificación recursiva para detectar las transformaciones del modelo de la planta y ajustar los parámetros del control a partir de supervisar los cambios de velocidad, del nivel en el molde y de la posición del asta-tapón.

Por su parte en (Watanabe et al., 1999) se hace referencia a que la ganancia del flujo de entrada al molde con respecto a la posición de la válvula es influenciada por las características del acero a vaciar y el ambiente de proceso que incluye la temperatura y el peso en la artesa.

En la publicación (Ikaheimonen et al., 2002) se presenta una herramienta de predicción del fenómeno de obstrucción en la boquilla mediante una red neuronal cuyas entradas se escogen a partir de un análisis estadístico con el cual se definen las variables potenciales a considerar. Un aporte valioso de este trabajo es que las experiencias realizadas confirmaron que la velocidad de vaciado y la posición de la válvula constituyen las variables que dan la primera indicación de obstrucción. La herramienta aquí presentada sólo permite estimar el tiempo disponible para continuar el vaciado.

En (Suzuki, 2004) se presenta un modelo que describe el flujo de acero líquido en un molde de planchones, pero la dinámica del nivel de acero en el molde se aborda desde el punto de vista de flujo de fluidos.

Por su parte en (Smutný et al., 2005) se presenta un sistema de control de nivel en molde del tipo asta-tapón, utilizado para vaciado de planchones en una planta de acero en la República Checa. En el artículo se presenta la estructura y la mayoría de los parámetros del modelo del sistema, que utiliza un actuador eléctrico descrito por modelado de tipo caja negra. Describe las principales perturbaciones y no linealidades que se presentan en el proceso, aporta una gráfica con características estáticas típicas de válvulas asta-tapón incluyendo casos donde están presentes los

fenómenos de erosión y obstrucción, no obstante en el modelo no se contemplan dichos fenómenos desde el punto de vista dinámico.

En (Furtmueller et al., 2005) se estudian las perturbaciones que inciden en la regulación de nivel en molde en una máquina de producción de planchones vaciando con alta velocidad. Se precisa que el comportamiento dinámico del servo sistema hidráulico es muy rápido. Entre las perturbaciones se relacionan la oscilación del molde, una señal ocasionalmente superpuesta al movimiento del asta-tapón, así como la erosión y obstrucción de la válvula y el ruido inherente a la medición de nivel por principio radioactivo. También se mencionan otras que inciden sobre el flujo de entrada al molde como los hinchamientos dinámicos, estos disturbios no pueden ser rechazados por un controlador estándar con ancho de banda bajo. Para atenuar los efectos de los mismos es importante disminuir: las demoras en el funcionamiento del actuador, el retraso de transporte en la caída del acero líquido por la buza sumergida y las limitaciones en la medición de nivel.

En el mismo trabajo de (Furtmueller et al., 2005) se propone un modelo del hinchamiento dinámico del planchón para estudiar a escala de simulación soluciones de control que atenúen su efecto en el nivel. Se intenta mantener un modelo lineal para hacer un simple análisis de frecuencia del lazo de control. En la solución se incluye un dispositivo y método para medición del momento en los motores de extracción con el objetivo de detectar los hinchamientos dinámicos. Por otra parte se determina el tiempo de retraso y la ganancia en la planta, para posteriormente lograr un control adaptable que sintonice por adelantado la ganancia de la retroalimentación y el tiempo de predicción.

Más recientemente en (Furtmueller and Re, 2008) se presenta un modelo de la planta con perturbaciones que refleja detalladamente la diversidad de fenómenos que pueden afectar la calidad del control. Para el diseño del sistema de control se trabaja con un modelo simplificado respecto al modelo de perturbaciones, que incorpora al modelo simple del proceso la perturbación del hinchamiento dinámico permitiendo detectarla y compensarla. Finalmente se demuestra la efectividad de la solución tanto a escala de simulación, como a través de su implementación en el proceso.

Los artículos revisados de este último autor no incluyen las transformaciones de la válvula desde el punto de vista dinámico, pero si ofrecen un modelado detallado del sistema de control de nivel para la producción de planchones, muy valioso para el estudio de sistemas similares.

3.2. Procedimiento para el modelado

Ante el reto de modelar el sistema de control de nivel en molde en la planta objeto de estudio, se estableció como objetivo obtener un modelo representando cada parte o elemento del sistema y las principales perturbaciones o transformaciones de la planta que afectan la calidad del control. Para ello se consideraron las referencias de modelos obtenidos con anterioridad (Paiuk et al., 1989), (Kong et al., 1992), (Kong and Keyser, 1993), (Keyser, 1997), (Asano, 1994), (Watanabe et al., 1999), (Ikaheimonen et al., 2002), (Suzuki, 2004), (Smutný et al., 2005), (Furtmueller et al., 2005), (Furtmueller and Re, 2008), así como la experiencia del comportamiento de la instalación objeto de estudio. Se desarrolló un modelo de caja gris o semifísico, el cual resulta de la combinación de la vía fenomenológica o modelado de caja blanca y la identificación experimental, llamada también modelado de caja negra (Aguado and Martínez., 2003).

En el procedimiento de modelado propuesto por (Alvarez et al., 2009) se define un segundo paso referido a fijar un nivel de detalle para el modelo de acuerdo con su utilización. En el presente trabajo estos detalles marcan una diferencia respecto a modelos anteriores y estuvieron dirigidos a: i) Implementar un modelado de los fenómenos de erosión y obstrucción por su incidencia en los momentos de deterioro de la calidad del control y su importancia para el propósito de lograr una futura optimización del sistema. ii) Lograr modelar el sistema por elementos y entre estos fundamentalmente el lazo de control de posición, para alcanzar mejor comprensión de la instalación y estudiar la configuración cascada con implementación multifrecuencia bajo esquema convencional.

De acuerdo al objetivo del modelado, los detalles acerca de su utilización, la descripción realizada en 2.1 y 2.2, y siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2, se procedió a obtener y validar un modelo aproximado del sistema de control.

Considerando que el sistema regularmente opera dentro de límites estrechos, se asumió un modelo lineal en la zona de operación. El modelado de primeros principios se aplicó para los bloques molde y válvula asta – tapón en la artesa, relacionando la variable de entrada posición de la válvula con el nivel como salida y representando las variables velocidad de vaciado y altura del líquido en la artesa como perturbaciones. Lo anterior se ha incluido en el modelo final mostrado en la Figura 13, omitiendo la deducción correspondiente, la cual se ha descrito en varios artículos como el de (Kong and Keyser, 1993).

La identificación experimental se utilizó para modelar el sistema de control de posición en bucle cerrado (lazo interno), el servomecanismo hidráulico, el sensor de nivel y el sistema completo a lazo cerrado. Luego se realizó identificación paramétrica fuera de línea para modelar los fenómenos de erosión y obstrucción, partiendo de datos estadísticos del proceso. De esta manera la consideración de dichos fenómenos otorga al modelo lineal un carácter variante en el tiempo.

A continuación se describen los detalles para obtener y validar los modelos de los elementos antes planteados. Por último, se compara el modelo del sistema a lazo cerrado analizado como un todo con el que resulta de combinar los modelos obtenidos para cada parte, incluyendo las funciones que representan a las transformaciones más significativas de la planta.

3.2.1. Identificación y validación de modelo del lazo de control de posición

El lazo de control de posición tiene varios componentes que son: i) El servosistema hidráulico compuesto por una servoválvula de regulación proporcional, tuberías y un cilindro hidráulico de doble efecto, doble vástago y fijación especial. ii) El sensor de posición ubicado en el cilindro, que genera una señal proporcional a la posición. iii) El controlador proporcional implementado desde un autómata programable. iv) La tarjeta de salida analógica que convierte la salida de control del PLC en una de voltaje. v) La tarjeta amplificadora que convierte la señal de salida anterior en una de corriente para actuar sobre el servosistema hidráulico.

Para realizar los experimentos de identificación del lazo de control de posición a lazo cerrado se seleccionó la función escalón por su sencillez y viabilidad de aplicación, así como su riqueza espectral capaz de excitar suficientemente el sistema para que muestre sus propiedades. Se eligió con una magnitud de -1 % considerando que la zona de operación es +/- 1 % de acuerdo a lo

reflejado en las curvas de trabajo de la instalación y se seleccionó una estructura de modelo similar a la utilizada por (Kong and Keyser, 1993). Los experimentos se realizaron en momentos en que no se estaba vaciando acero, garantizando condiciones de funcionamiento similares a la operación normal en el lazo de posición. Se seleccionó como señal de entrada la posición de referencia y como salida la posición del cilindro del servosistema. Las señales se registraron con un intervalo de muestreo de 10 ms a través de una computadora conectada al autómatas programable. Las respuestas obtenidas durante los ensayos fueron subamortiguadas con un tiempo de establecimiento aceptable y un pequeño sobrepaso.

Los datos de los experimentos se convirtieron en valores de desviación con respecto a una posición inicial tomada como referencia y se importaron en el MatLab® para su procesamiento con el Toolbox de Identificación. Se probaron diferentes estructuras y diferentes órdenes; la Tabla 1 refleja los mejores modelos con los ajustes correspondientes. No resultaron con buenos ajustes ni adecuadas propiedades en cuanto a respuesta transitoria, estabilidad (diagramas de polos y ceros) y análisis de residuos, los modelos obtenidos en tiempo continuo utilizando PEM, ni con el OE y BJ en tiempo discreto.

Tabla 1: Modelos seleccionados para el lazo de control de posición

Algoritmo	Orden	Ajuste (%)
ARX	na=2, nb=1, nk=1	94.58
ARX	na=2, nb=1, nk=1	94.66
ARMAX	na=2, nb=2, nc=2, nk=1	92.4
ARMAX	na=2, nb=1, nc=1, nk=1	91.26

Entre los modelos de la Tabla 1 se seleccionó el ARX-211, por su mejor ajuste y buenas propiedades. En la Figura 3 se muestra la comparación de la salida real con la del modelo seleccionado.

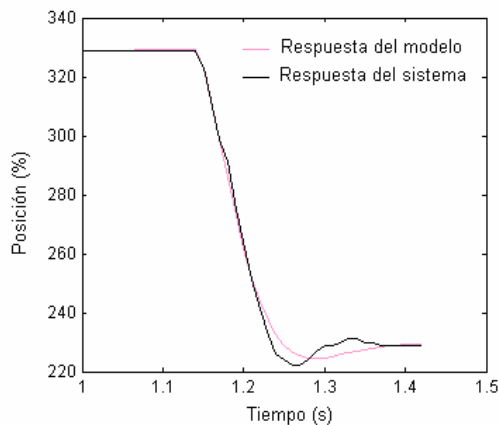


Figura 3: Respuesta del sistema y del modelo.

El Modelo en tiempo discreto es:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (1)$$

$$A(q) = 1 - 1.603 q^{-1} + 0.6703 q^{-2} \quad (2)$$

$$B(q) = 0.06723 q^{-1} \quad (3)$$

Transformando el modelo anterior a su equivalente en tiempo continuo se obtiene la Función de Transferencia del sistema de control de posición a lazo cerrado:

$$G_{LP}(s) = \frac{0.004699 s + 1}{0.001219 s^2 + 0.04875 s + 1} \quad (4)$$

Tabla 2: Parámetros del modelo representado en (4)

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
T_s	Constante de tiempo del servomecanismo	0.004699	s
ζ_s	Coefficiente de amortiguamiento	0.6	
w_s	Frecuencia natural	28.64	Hz

Del resultado anterior se aprecia que el sistema analizado es rápido comparándolo con otros similares (Kong et al., 1992). Posteriormente se realizaron experimentos a lazo abierto para identificar el servosistema hidráulico. En la Figura 4 se muestran las respuestas luego de excitar con escalones de 1, 2, 3 y 4 %, constatando que es un integrador con tendencia no lineal. De las mismas se seleccionó la respuesta obtenida con escalón de 1% por corresponderse con el punto de operación.

Para obtener el modelo desglosado del lazo de posición solo falta la función de transferencia del sensor, la cual se deducirá aplicando el álgebra de los diagramas de bloques (Figura 5). Los datos y símbolos correspondientes a los restantes elementos se resumen en la Tabla 3.

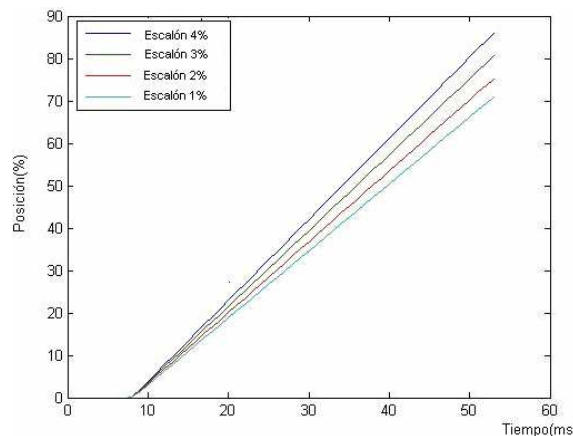


Figura 4: Respuestas del servosistema hidráulico variando la magnitud de la señal escalón a la entrada.

Tabla 3: Datos y símbolos utilizados en (5) – (8)

Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
Kc	Ganancia del controlador	16	%/%
Kt	Ganancia tarjeta de salida	0.1	%/V
Kd	Ganancia tarjeta amplificadora	1.5	V/mA
Kp	Ganancia servo hidráulico	9.54	mA/%

Considerando los símbolos anteriores, la ecuación (4) puede escribirse en la forma equivalente (5):

$$G_{LP}(s) = \frac{(T_1 s + 1)}{\frac{T_2}{K_p K} s^2 + \left(\frac{1}{K_p K} + T_1\right) s + 1} \quad (5)$$

$$T_1 = 0.004699 \text{ s}$$

$$\frac{T_2}{KpK} = 0.001219$$

$$\frac{1}{KpK} + T_1 = 0.04875$$

Partiendo del modelo a lazo cerrado planteado en (5), puede deducirse la función del camino directo como:

$$G_D(s) = \frac{Kp * K (T_1s + 1)}{s(T_2s + 1)} \quad (6)$$

Y la función del camino de retroalimentación como:

$$G_R(s) = 1 \quad (7)$$

Donde:

$$K = Kc * Kt * Kd \quad (8)$$

La función identificada del servosistema hidráulico es:

$$G_{SH}(s) = \frac{Kp}{s} \quad (9)$$

Resultando como función de transferencia para el sensor:

$$G_{SP}(s) = \frac{(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)} \quad (10)$$

Siendo $K = 2.4$, $Kp = 9.54$, al despejar se obtiene:

$$T_2 = 0.0249 \text{ s}$$

Con los últimos valores obtenidos se completa el modelo desglosado, el cual fue validado al comparar su respuesta con la salida real de un experimento a lazo cerrado (Figuras 5 y 6).

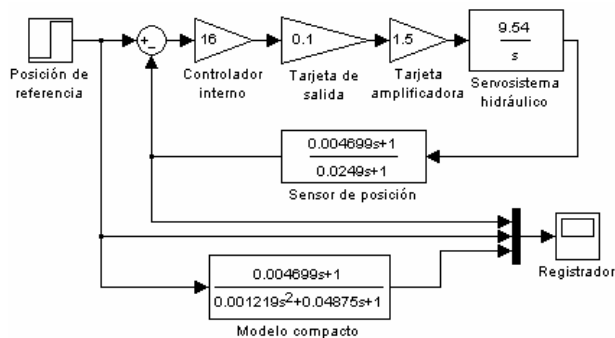


Figura 5: Modelos desglosado y compacto del sistema de control de posición.

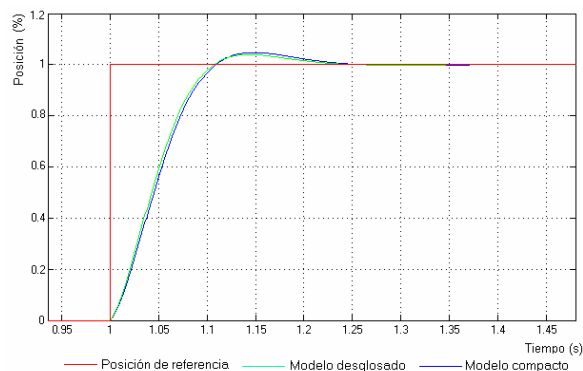


Figura 6: Comparación de las respuestas de ambos modelos.

3.2.2. Identificación y validación de modelo del sensor de nivel

El sensor de nivel está compuesto por una fuente emisora de radiaciones gamma con baja intensidad, un detector de radiaciones y una unidad electrónica, esta última recibe y procesa los pulsos del detector para generar una señal de 4 a 20 mA proporcional al nivel del molde.

El principio de medición se basa en las leyes físicas sobre la atenuación de la radiación nuclear cuando atraviesa una sustancia, donde la intensidad original de la fuente se debilita al atravesar un material según su espesor y densidad, lo cual determina la absorción de las radiaciones gamma siguiendo la expresión matemática (11):

$$I = I_o * e^{-\mu * \rho * d} \quad (11)$$

Tabla 4: Símbolos utilizados en (11)

Símbolo	Descripción	Unidades
I_o	Intensidad original de la fuente	Bq
μ	Coefficiente de absorción que depende del tipo de radiación	cm ² /g
ρ	Densidad del material	g/cm ³
d	Espesor del material	cm

El detector de radiaciones y la unidad electrónica son productos de alta calidad, fabricados en correspondencia con las exigencias de la planta. El sensor logra minimizar el ruido de la medición de nivel intrínseco a la radioactividad con la utilización de detectores de alta sensibilidad y garantizando un procesamiento de la señal con rapidez y estabilidad. También se ha elevado la fiabilidad del equipamiento capaz de auto-detectar fallos. En la Figura 7 se muestra un esquema de montaje, el sistema es controlado por microprocesador y memoriza los valores de la calibración. También realiza funciones para compensar o reajustar progresivamente dicha calibración, en correspondencia con la decadencia de la intensidad de la fuente.

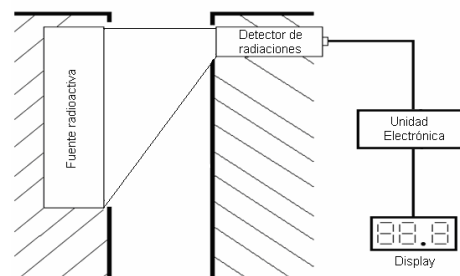


Figura 7: Esquema de montaje del sensor de nivel.

En la Figura 8 se observa la instalación diseñada para realizar los experimentos de identificación del sensor de nivel. Sobre el molde se colocó una estructura metálica para sostener un bloque de calibración o palanquilla de prueba. Se fijaron dos detectores de metal para detectar los instantes de inicio y final del movimiento del bloque. Al dejar caer el bloque se simuló un escalón de disminución del nivel.



Figura 8: Montaje del simulador para los experimentos.

Se realizaron varios experimentos, para el registro de datos se utilizó intervalo de muestreo de 20 ms. Los ensayos permitieron lograr la información deseada y la optimización del sistema de medición para obtener la respuesta que de acuerdo a criterios prácticos resultó la mejor atendiendo a precisión, rapidez y estabilidad de la señal de salida.

Tras procesar los datos en el MATLAB® se seleccionaron los mejores modelos que se muestran en la Tabla 5. Los resultados con el PEM para modelos en tiempo continuo y con los algoritmos OE y BJ para modelos discretos no fueron buenos.

Tabla 5: Modelos seleccionados para el sensor de nivel

Algoritmo	Orden	Ajuste (%)
ARMAX	na=2, nb=1, nc=1 y nk=1	96.11
ARMAX	na=2, nb=2, nc=2 y nk=1	96.42
ARX	na=2, nb=1 y nk=1	93.8
ARX	na=2, nb=2 y nk=1	94.73

Finalmente se escogió el ARMAX-2111 porque tiene menor orden con similar ajuste al ARMAX-2221. También tiene buenas propiedades de estabilidad y buen comportamiento de los residuos. En la Figura 9 se observa la validación cruzada.

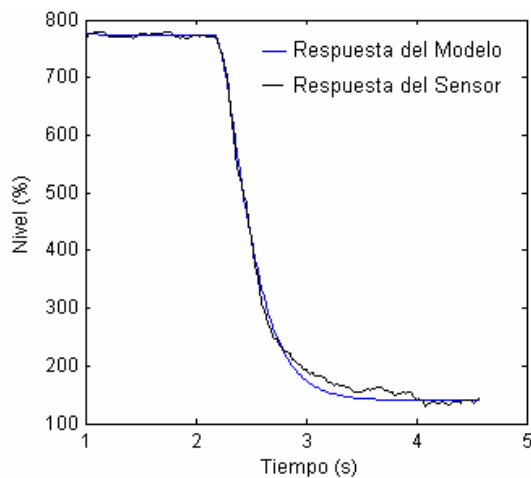


Figura 9: Respuestas real y del modelo para el sensor de nivel.

El Modelo en tiempo discreto es:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (12)$$

$$A(q) = 1 - 1.786 q^{-1} + 0.7974 q^{-2} \quad (13)$$

$$B(q) = 0.01138 q^{-1} \quad (14)$$

$$C(q) = 1 - 0.7715 q^{-1} \quad (15)$$

Transformando el modelo a la forma de cociente de polinomios en s se obtiene la siguiente Función de Transferencia como modelo del sensor de nivel:

$$G_{SN}(s) = \frac{0.0096 s + 1}{0.031 s^2 + 0.1566 s + 1} \quad (16)$$

3.2.3. Identificación y validación de los fenómenos de obstrucción y erosión en la válvula asta-tapón

El bloque válvula asta-tapón en la artesa que se muestra en la Figura 2 es muy importante en el tipo de control de nivel en molde objeto de estudio. Una válvula nueva tiene una característica estática aproximadamente lineal, pero con el transcurso del tiempo esta puede variar luego de someterse a procesos de vaciado con determinados aceros que pueden provocar la erosión u obstrucción de este elemento (Smutný et al., 2005). Por lo antes mencionado, el modelado de esos eventos aporta mayor utilidad al modelo que se construye.

En la documentación técnica del fabricante de la válvula empleada en la instalación aparece una tabla que relaciona apertura en mm versus área libre del anillo por donde fluye el acero en mm². Estos valores se graficaron para corroborar el carácter lineal y se calculó la ganancia en la zona de operación.

La obstrucción se produce fundamentalmente en aceros con una composición química de mayor contenido de inclusión alúmina y es más probable en aceros donde se realiza desoxidación con aluminio. En tal caso ocurre adherencia de material en el asiento de la boquilla y en la punta del asta-tapón, lo cual implica un desplazamiento de la curva característica hacia la derecha lo que se traduce en un desplazamiento hacia arriba de la posición de trabajo de la válvula. Además, aumenta la pendiente en la parte central de la característica de la válvula o zona operacional de la misma.

La erosión puede presentarse en aceros de bajo contenido de carbono que durante el vaciado tienen mayor contenido de oxígeno. Este fenómeno implica un desplazamiento de la curva característica hacia la izquierda, lo que corresponde a un desplazamiento hacia abajo de la posición de la válvula. También aumenta la pendiente en la parte central de la característica de la válvula o zona operacional de la misma, aunque en menor magnitud que para la obstrucción.

Los eventos mencionados anteriormente no se manifiestan simultáneamente en un mismo ciclo de vaciado. Usualmente los mismos comienzan a manifestarse luego de transcurrido cierto tiempo de vaciado, en particular en la instalación objeto de estudio posterior a la primera hora. Una vez que aparecen se desarrollan progresivamente sin que se pueda preestablecer su duración. Cuando se efectúan repetidos cambios en la velocidad de vaciado en decremento o aumento, también se afecta la posición de la válvula sufriendo desplazamientos negativos o positivos respectivamente.

Para representar la obstrucción se seleccionó una muestra de coladas con presencia del fenómeno y de estas las respuestas obtenidas en las cartas registradoras de las coladas 3582 y 3585 (Figura 10). Los ciclos de vaciado con presencia de obstrucción tienden a ser más cortos que los de erosión, el fenómeno comienza a presentarse de una forma suave y luego en forma más agresiva. Se constató que luego de comenzar a manifestarse se torna marcado en intervalos superiores a una hora. Por tanto, para

el estudio se estableció el intervalo de tiempo igual a una hora como patrón para todos los casos analizados. En el primer ejemplo la posición inicial era de 69 % y terminó en un 79 % (incremento de 10 %/h) y en el segundo comenzó en un 68.4 % y terminó en un 75.6 % (incremento de 7.2 %/h). Estos cambios, tal como se explicó anteriormente se deben a un incremento de la ganancia de la válvula y por las características del fenómeno a un desplazamiento positivo de la posición.

Para identificar el fenómeno y representarlo a escala de simulación se tabularon los datos de las cartas registradoras, correspondiente a dos ciclos de vaciado y se hizo un análisis de regresión. En ambos casos una vez que se manifestó el fenómeno se tomó la posición de la válvula en ese instante como posición relativa cero, porque a los efectos del control, la posición absoluta de la válvula no es significativa. El coeficiente de correlación obtenido para estos casos fue de 83.68 % y 81.79 % respectivamente. La similitud de la tendencia de la posición en el tiempo entre las curvas para ciclos de vaciado diferentes, la aproximación lineal con un ajuste aceptable y similar para los ejemplos tomados, permiten considerar válida la representación del fenómeno de la obstrucción por (17), obtenida con un coeficiente de correlación de 83.68 %:

$$y = 0.0014333t + 0.802 \quad (17)$$

Tabla 5: Símbolos utilizados en (17) y (18)

Símbolo	Descripción	Unidades
y	Variación de la Posición	%
t	Tiempo	s

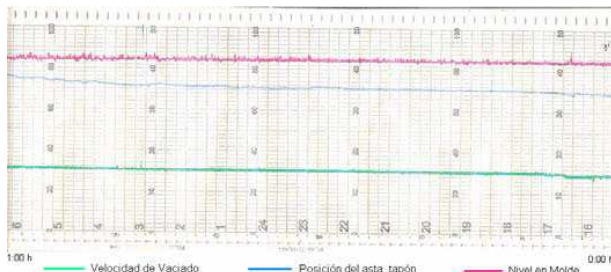


Figura 10: Fotografía de un intervalo de una hora en la carta registradora de la colada 3585.

Para implementar el fenómeno antes referido en el modelo, el resultado de (17) debe obtenerse con la superposición de dos eventos: una función de incremento de la ganancia original de la válvula considerando la curva correspondiente presentada en (Smutný et al., 2005) más otra función de desplazamiento positivo de la posición de la válvula (Figura 13).

Para representar la erosión se seleccionó una muestra de coladas con presencia del fenómeno y de estas las respuestas obtenidas en las cartas registradoras de las coladas 3733 (Figura 11) y 3734. Estas se seleccionaron por el desplazamiento significativo de la posición hacia valores negativos, constatándose que luego de comenzar a manifestarse se torna marcado en intervalos superiores a una hora. Por lo anterior se estableció el intervalo de tiempo igual a una hora como patrón para los casos analizados. En el primer ejemplo la posición inicial era de 65.8 % y terminó en 60.7 % (disminución de 5.1 %/h) y en el segundo comenzó en 70.1 % y terminó en 65.9 %, (disminución de 4.2 %/h). Estos cambios, tal como se explicó anteriormente se deben

a un incremento de la ganancia de la válvula y a un desplazamiento negativo de la posición.

Para identificar el fenómeno y representarlo a escala de simulación se tabularon los datos de las cartas registradoras, correspondiente a dos ciclos de vaciado y se hizo un análisis de regresión. En ambos casos una vez que se manifestó el fenómeno se tomó la posición de la válvula en ese instante como posición relativa cero, porque a los efectos del control, la posición absoluta de la válvula no es significativa. Los coeficientes de correlación fueron de 97.41 % y 97.84 % respectivamente. La similitud de la tendencia de la posición en el tiempo entre ambas curvas para ciclos de vaciado diferentes y la aproximación lineal con buen ajuste permite considerar válida la representación del fenómeno por (18), obtenida con un coeficiente de correlación de 97.41 %:

$$y = -0.0013316t + 0.453 \quad (18)$$

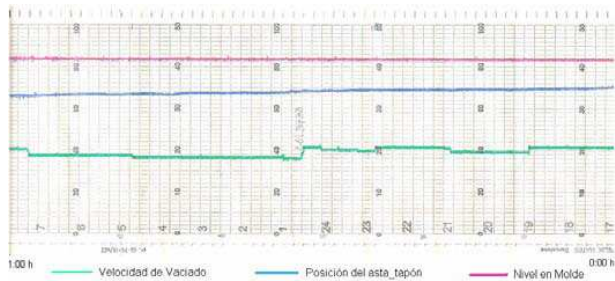


Figura 11: Fotografía de un intervalo de una hora en la carta registradora de la colada 3733.

Para implementar el fenómeno antes descrito en el modelo, el resultado de (18) debe obtenerse con la superposición de dos eventos: una función en el tiempo para el incremento de la ganancia original de la válvula considerando la curva correspondiente presentada en (Smutný et al., 2005) más otra función de desplazamiento negativo de la posición (Figura 13).

3.2.4. Identificación del Sistema de Control de Nivel en Molde en conjunto.

Los experimentos se prepararon con especial cuidado atendiendo a su realización con la planta en operación produciendo palanquillas de 0.13x0.13 m². Para los mismos se usó como señal excitadora un escalón de un 10 % del nivel de referencia, considerándolo como una perturbación pequeña y a su vez relativamente grande respecto a la magnitud de +/- 1 % en el ruido presente en la medición de nivel. El periodo de muestreo fue de 0.02 s, utilizando el mismo sistema de monitoreo que para los casos anteriores.

En el momento de realización de los experimentos la altura de líquido en la artesa era de 0.85 m y la velocidad de vaciado 0.038 m/s, estos datos corresponden a las principales variables perturbadoras que inciden en los resultados de la simulación.

Al analizar las curvas de operación de la instalación en una muestra de cien ciclos de vaciado, se pudo constatar que en el momento de arranque o inicio se aprecian valores de juego libre de hasta 0.002 m en el actuador de la válvula asta- tapón. Sin embargo, posterior al arranque el mecanismo se sitúa en un punto de operación y la manifestación del juego libre alrededor de dicho punto es despreciable, por lo que en el modelo no se incluye este tipo de no linealidad.

Los datos obtenidos en los experimentos se procesaron de manera similar a las identificaciones anteriores. Para ello se

probaron diferentes estructuras y órdenes, partiendo del orden seis como resultado de considerar las funciones de transferencia obtenidas anteriormente para los diferentes elementos que componen el sistema: el controlador externo tiene una integración, el servosistema hidráulico es de segundo orden, el molde es un integrador y el sensor de nivel es de orden dos. Al igual que en los casos anteriores, se obtuvieron varios modelos tanto discretos como continuos (PEM), siendo los mejores los mostrados en la Tabla 6 atendiendo a su ajuste y propiedades.

Tabla 6: Modelos seleccionados para el sistema de control de nivel

Algoritmo	Orden	Ajuste (%)
ARMAX	na=6, nb=6, nc=6 y nk=1	84.4
ARMAX	na=10, nb=10, nc=10 y nk=1	83.62
ARX	na=6, nb=6 y nk=1	76.36
ARX	na=10, nb=10 y nk=1	75.19

Entre los anteriores se escogió el ARMAX-6661 por tener buenas propiedades en cuanto a estabilidad y el mayor ajuste de los datos con 84.4%, considerándose aceptable dada la presencia de ruidos en la medición de nivel debidos al principio radioactivo y a las oscilaciones del molde. En la Figura 12 se comparan la salida real y la del modelo.

A partir del análisis de las respuestas obtenidas en los diferentes experimentos se consideró un retraso de transporte aproximado de 0.8 s. Para implementar a escala de simulación los fenómenos de válvula obstruida o válvula erosionada, se agregó un interruptor que permite seleccionar la situación en cada caso.

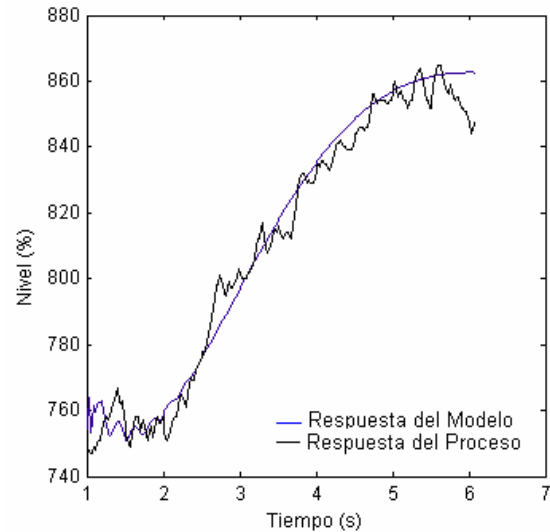


Figura 12: Respuestas del sistema real y del modelo.

Para comparar el modelo ARMAX-6661 con el modelo desglosado de la Figura 13, se usó el comando compare del MatLab®. El resultado de esta comparación arrojó una semejanza de 95.4 %, corroborando que el modelo desglosado es semejante al modelo obtenido en la identificación a lazo cerrado.

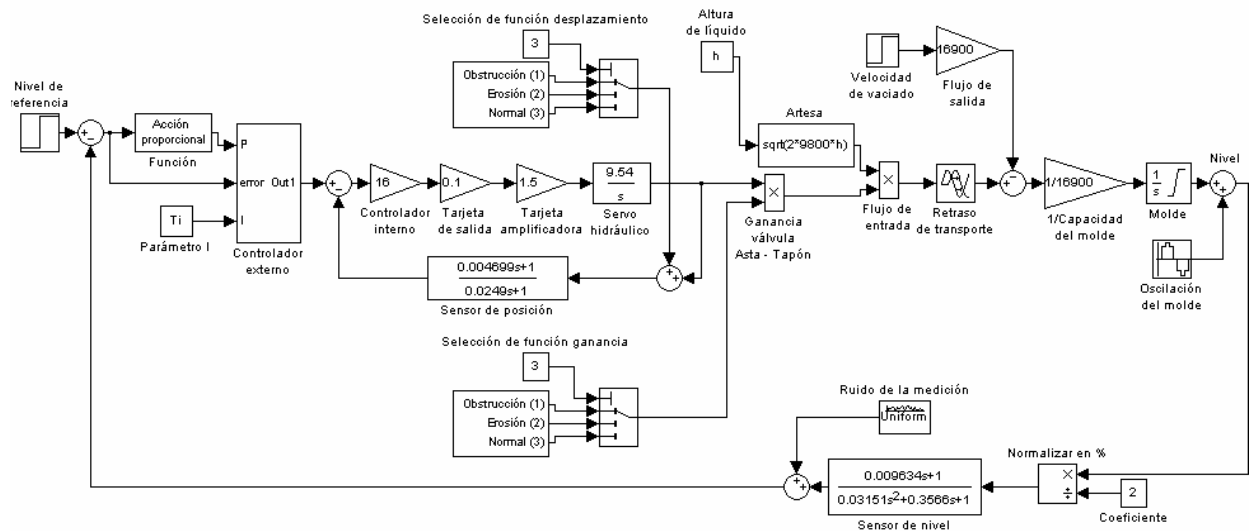


Figura 13: Diagrama en bloques detallado del sistema de control de nivel en molde.

4. Conclusión

En el modelado del sistema de control de nivel en molde que se presenta, se utilizan técnicas conocidas para documentar detalladamente la aplicación. El resultado permite evaluar con mayor exactitud el comportamiento de la instalación en estado de régimen estacionario y frente a las principales perturbaciones y

transformaciones de la planta que influyen en el comportamiento dinámico y afectan la calidad del control.

El resultado aquí obtenido será de utilidad, en lo adelante, para lograr una solución de control superior a la actual, pretendiéndose elevar la capacidad de adaptación del controlador para una planta con modelo lineal variante en el tiempo. Al respecto, a escala de simulación, se han realizado experimentos alentadores con la utilización de técnicas de control borroso.

English Summary

Modeling of Mould Level Control in a Continuous Casting for steel billets

Abstract

This paper presents a model of system for the mould level control in a continuous casting machine for steel billets. The objective was to carry out the modeling of each element of the system including disturbances and transformations of the plant that affect the quality of control in the installation study object. It was obtained and validated an approximate model of the control system using physical laws governing the same one, experimental identification by special signals and parametric identification off-line. The model explicitly includes the phenomena of obstruction and erosion of the valve which have a significant impact on the operation of the plant. For hydraulic servo system achieved a gray box model contributes to a better understanding of the process and evaluates incidence of the multi-frequency implemented under conventional outline. Obtained the model can be studied scale simulation system operation and the effectiveness of advanced control solutions. The developed work is part of an I+D process that in the course of more than 10 years, it has contributed to that in the steelmaking where is carried out the investigation, there is a mould level control system that has positive impact on the quality of steel produced.

Keywords:

Modeling, Steel Industry, Level Control

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la contribución de operarios, especialistas y la dirección de la Empresa Acinox Las Tunas, así como al asesoramiento del Departamento de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de La Universidad de Oriente. Fue importante la disposición de la firma RGI Industriemessgeräte GMBH, productora del sistema de medición de nivel, para lograr optimizar las características de dicho equipamiento.

Referencias

Aguado, A. and M. Martínez, 2003. Identificación y Control Adaptativo. Prentice Hall.

- Alvarez, H., R. Lamanna, P. Vega y S. Revollar, 2009. Metodología para la Obtención de Modelos Semifísicos de Base Fenomenológica Aplicada a una Sulfitadora de Jugo de Caña de Azúcar. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 6, no. 3, pp. 10-20.
- ASSOCIATION, worldsteel, 2012. Steel Statistical Yearbook 2012. <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive.html>
- Azano, K., 1994. A molten steel level control method for continuous casting based on the disturbance observer theory. *Seminars on California Institute of Technology*, May 24, 1994. California, USA.
- Craig, I. K., F. R. Camisani-Calzolari, and P. C. Pistorius, 2001. A contemplative stance on the automation of continuous casting in steel processing. *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 9, pp. 1013-1020.
- Furtmueller, C., and L. D. Re, 2008. Control Issues in Continuous Casting of Steel. *Proceedings of 17th IFAC World Congress*. COEX, Korea, South.
- Furtmueller, C., L. D. Re, H. Bramerdorfer, and K. Moerwald, 2005. Periodic Disturbance Suppression in a Steel Plant with Unstable Internal Feedback and Delay. *Proceedings of 5th International Conference on Technology and Automation*. Thessaloniki, Greece.
- Goodwin, G. C., S. F. Graebe, and M. E. Salgado, 2000. *Control System Design*. Prentice Hall.
- Ikaheimonen, J., K. Leiviska, J. Ruuska, and J. Matkala, 2002. Nozzle clogging prediction in continuous casting of steel. *Proceedings of 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.
- Jämsä-Jounela, S.-L., 2001. Current status and future trends in the automation of mineral and metal processing. *Control Engineering Practice* 9, pp. 1021–1035.
- Keyser, R. M. C. De, 1997. Improved mould-level control in a continuous steel casting line. *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 2, pp. 231-237.
- Kong, F., and R. De Keyser, 1993. Identification and control of the mould level in a continuous casting machine. *Proceedings of Second IEEE Conference on Control Applications*. Vancouver, BC, Canada.
- Kong, F., R. De Keyser, C. Martien, and D. Verhasselt, 1992. Model identification for the mould level control loop in a continuous casting machine. *Proceedings of IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*. Beijing, PRC.
- Paiuk, J., A. Zanini, M. Remorino, and O. Frola, 1989. The Automatic Mould Level Control for a Continuous Casting Process. *Practical Implementation of Different Control Algorithms*. *Proceedings of 6th Symposium on Automatization in Mining, Mineral and Metal Proc.* Buenos Aires, Argentina.
- Schuurmans, J., 2011. Continuous casting and mould level control. <http://www.dsc.tudelft.nl/~wb2421/process.pdf>
- Smutný, L., R. Farana, A. Viteček, and D. Kačmář, 2005. Mould Level Control for the Continuous Steel Casting. *Proceedings of 16th IFAC World Congress*. Prague, Czech Republic.
- Suzuki, D., 2004. Formulation of Mold Level Control Model by Molten Steel Flow Analysis Method. *Nippon Steel Technical Report*, no. 89, January 2004.
- Thomas, B. G., K. H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, and S. Mahajan, 2001. Continuous Casting. *The Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, vol.2, pp.1595-1599.
- Thomas, B. G., Q. Yuan, S. Sivaramakrishnan, and a. S. P. Vanka, 2002. Transient Fluid Flow in a Continuous Steel-Slab Casting Mold. <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Thomas/Thomas-0201.html>
- Watanabe, T., K. Omura, M. Konishi, S. Watanabe, and K. Furukawa, 1999. Mold Level Control in Continuous Caster by Neural Network Model. *ISIJ International*, vol.39, no.10, pp. 1053-1060.