

State Feedback Temperature Control Based on a Smith Predictor in a Preheater of a Cement Kiln

J. Salcedo, V. Feliu, *Senior Member, IEEE*, and R. Rivas

Abstract—This paper proposes the design of a state feedback Smith predictor controller (*SFC-SP*) for the effective temperature control in a preheater of a cement rotary kiln. The dynamic model of this process is obtained from real-time data by applying a system identification procedure. This identification procedure yields a fourth order with dominant time delay transfer function. A state feedback controller combined with a Smith predictor is therefore designed which behaves effectively. Simulated results compare the performance of the proposed controller with a standard *PID* controller. Two performance indexes have been used in this comparison: the integral absolute error (*IAE*), and the control effort (*EU*). Simulations show that the proposed controller provides lower values of these indexes and, therefore, outperforms the standard *PID* controller in terms of performance and accuracy.

Index Terms—State feedback controller, Smith predictor, Cement rotary kiln, Preheater, System identification, Temperature control.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento presenta un alto potencial de desarrollo debido a que el cemento constituye uno de los recursos más utilizados en el mundo [1]. No obstante, esta industria es una de las de mayor consumo de energía y emisión de CO_2 [2], [3].

En esta industria, el horno rotatorio de cemento constituye el equipo principal de su proceso productivo [4], [5]. Actualmente, debido al continuo aumento en la demanda de cemento, así como a las estrictas medidas de protección del medio ambiente, los hornos rotatorios de cemento de menor eficiencia energética, como por ejemplo los hornos rotatorios vía húmeda y/o vía semi-húmeda, están siendo remplazados por hornos rotatorios vía seca con precalentador de ciclones y precalcinador, los cuales mejoran la calidad del clinker y aumentan la eficiencia térmica [6]-[9].

J. Salcedo is with the Departamento de Ingeniería of the Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Lima, Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 32, Perú (e-mail: jose.salcedo@pucp.edu.pe).

V. Feliu is with the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, and Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Edificio Politécnico, Ave. José Cela, 3, C.P. 13071, Ciudad Real, España (e-mail: vicente.feliu@uclm.es).

R. Rivas is with the Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 No 11901, Marianao, La Habana, C.P. 19390, Cuba La Habana, Cuba, (raul.rivas@pucp.edu.pe; rivas@automatica.cujae.edu.cu).

El precalentador consiste en una torre vertical que contiene una serie de ciclones con un sistema de combustión auxiliar (precalcinador) ubicado en la parte inferior de la torre de precalentamiento para aumentar la temperatura de la harina cruda antes de introducirla en el horno rotatorio [10]. El precalcinador posibilita: aumentar la capacidad del horno, utilizar una amplia gama de combustibles, mejorar la calidad del clinker, reducir la carga térmica del horno y prolongar la vida útil del revestimiento del horno [10].

El precalentador calienta la harina cruda utilizando los gases calientes procedentes del horno rotatorio y del precalcinador, mientras que el precalcinador proporciona calor adicional a la harina cruda hasta alcanzar una temperatura entre 860°C y 950°C , en la cual se produce el proceso de descarbonatación parcial que depende en gran medida de la temperatura y afecta directamente al consumo de energía [11]. Es bien sabido que el 60 % del consumo de energía de los hornos rotatorios vía seca tiene lugar en el precalcinador [12].

Las variaciones en el grado de descarbonatación de la harina cruda que ingresa al horno tienen un fuerte impacto en la calidad del clinker y en el consumo energético [13]. Por ello, los operadores mantienen alta la temperatura del precalcinador para garantizar un alto grado de descarbonatación y estabilizar el proceso originando efectos negativos en la mecánica del horno tales como: aceleración del desgaste del revestimiento refractario en los ciclones, lo que aumenta las actividades de mantenimiento y reparación, así como los costos de producción; incremento en la viscosidad de la harina cruda, lo que acrecienta el riesgo de bloqueo de los ciclones; y aumento del consumo de energía y de la emisión de gases contaminantes [12]. Por consiguiente, el control estricto de la temperatura en el precalcinador resulta decisivo para garantizar una buena calidad del clinker, así como un uso eficiente de la energía [14].

Sin embargo, debido al complicado comportamiento dinámico de este proceso, el cual se caracteriza por presentar retardo de tiempo dominante, así como grandes perturbaciones [15], [16], el diseño de controladores efectivos de temperatura en el precalcinador representa una tarea muy compleja [15].

Usualmente, la temperatura en el precalcinador se regula mediante controladores convencionales *PI/PID* [12], [15]. No obstante, es bien sabido que los controladores convencionales no son suficientes cuando los procesos se caracterizan por presentar retardos de tiempo dominantes [17]-[19].

El predictor de Smith (*SP*) es uno de los controladores más utilizados en el ámbito industrial para el control de procesos con retardo de tiempo dominante, ver por ejemplo [20]-[22].

La principal ventaja de este controlador consiste en que el control del proceso se realiza mediante la salida de un modelo del proceso sin retardo de tiempo. De este modo, el diseño y análisis de sistemas de control de procesos con retardo de tiempo se realiza como si no existiera dicho retardo [23]–[25]. Sin embargo, las prestaciones de este controlador se degradan significativamente cuando los procesos se encuentran bajo el efecto de grandes perturbaciones externas [26]–[29].

Para el control de procesos sometidos al efecto de grandes perturbaciones, uno de los controladores utilizados en el entorno industrial es el controlador por realimentación de estado (*SFC*), el cual se distingue por su precisión, así como por su sencilla implementación práctica [30]–[32]. Sin embargo, el desempeño de esta clase de controladores se deteriora de forma considerable cuando el proceso presenta retardo de tiempo dominante [33], [34]. En consecuencia, se propuso en [35] la combinación de un predictor de Smith con un control por realimentación de estado para aliviar este problema.

El objeto de este trabajo consiste en regular la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio vía seca de cemento mediante un controlador por realimentación de estado basado en un predictor de Smith (*SFC-SP*). Nuestra propuesta - que se basa en [35] - pretende combinar las ventajas de ambos controladores para aplicarlos por primera vez a este proceso: el controlador *SFC-SP* se caracteriza por su baja sensibilidad frente al retardo de tiempo, así como por su capacidad de compensar los efectos negativos de las perturbaciones externas.

Las principales contribuciones de este trabajo consisten en: 1) la obtención de un modelo matemático del comportamiento dinámico de la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio de cemento vía seca mediante la aplicación de métodos experimentales de identificación de sistemas; 2) el control de la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio de cemento vía seca mediante un controlador *SFC-SP*, el cual se comporta de forma efectiva frente al efecto del retardo de tiempo y de perturbaciones externas.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En la Sección 2 se obtiene un modelo matemático del comportamiento dinámico de la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio vía seca mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas. En la Sección 3 se realiza el diseño de un controlador *SFC-SP* para el control de la temperatura en el precalcinador. En la Sección 4 se compara mediante simulaciones las prestaciones de los controladores *SFC-SP* vs *SP-PI* vs *PI*. Finalmente, la Sección 5 ofrece algunas conclusiones.

II. IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA TEMPERATURA EN EL PRECALCINADOR

El precalcinador objeto de estudio corresponde a un horno rotatorio vía seca de la empresa Cementos Lima, la cual forma parte de Unión Andina de Cementos (UNACEM) y es la empresa productora de cemento más importante del Perú [36].

En la Fig. 1 se muestra un diagrama del horno objeto de estudio con el precalentador de ciclones de cuatro etapas y el precalcinador. El precalcinador se encuentra equipado con un sensor de temperatura (TT), un sensor de flujo (FT) y una

válvula de control del flujo de combustible que ingresa al quemador del precalcinador. Además, el horno rotatorio dispone de un PLC SIMATIC S7-300 y de una estación de control (PC industrial) que tiene un sistema SCADA para la supervisión de todo el proceso productivo del horno rotatorio, lo cual facilita las labores de recolección y almacenamiento de datos. La segunda válvula de control se utiliza en el control de la temperatura en la zona de combustión del horno rotatorio de cemento mediante un lazo de control que regula el flujo de combustible que ingresa al quemador de dicho horno.

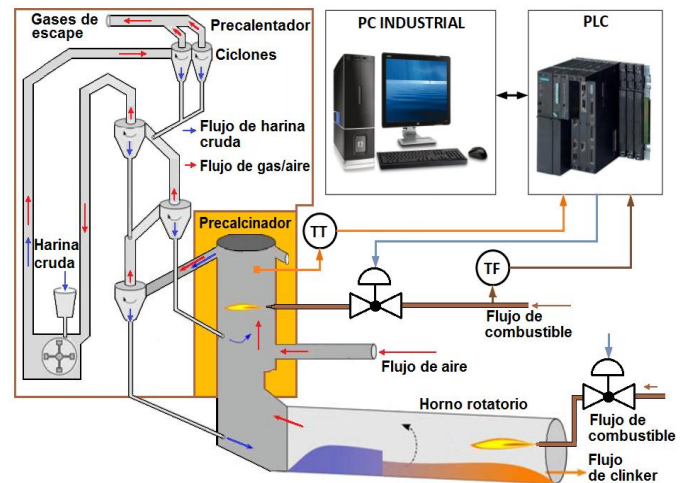


Fig. 1. Diagrama del horno rotatorio vía seca con precalentador y precalcinador objeto de estudio.

La harina cruda procedente del molino de crudo ingresa al precalentador de ciclones de cuatro etapas donde es calentada mediante los gases de combustión generados en el horno rotatorio y en el precalcinador (ver Fig. 1). Una vez que la harina cruda pasa por la tercera etapa de ciclones, entra al precalcinador donde alcanza una temperatura de 950°C y, por consiguiente, es descarbonatada y calcinada casi en su totalidad mediante las corrientes cruzadas con los gases de la combustión procedentes del horno rotatorio. La harina cruda caliente entra a la cuarta etapa de ciclones para finalmente ingresar al horno rotatorio, en el cual se obtiene el clinker.

Para el diseño del controlador *SFC-SP* se requiere disponer de un modelo matemático que describa de forma adecuada el comportamiento dinámico de la temperatura en el precalcinador objeto de estudio. Sin embargo, la obtención de un modelo fenomenológico basado en las leyes físicas en las que se fundamenta el funcionamiento del precalcinador resulta muy difícil debido a su complejo comportamiento dinámico [10].

Actualmente, para el desarrollo de modelos matemáticos adecuados de procesos industriales complejos se están utilizando de forma exitosa los métodos y herramientas experimentales de identificación de sistemas, ver por ejemplo [37]–[39]. Es por ello que en este trabajo se utilizan los procedimientos de identificación de sistemas [37], [40] para la obtención de un modelo matemático adecuado del proceso de temperatura en el precalcinador en base a los datos observados (medidos) en tiempo real de sus variables de entrada y salida.

En el desarrollo de los experimentos para la identificación

del sistema se consideraron como variable de entrada (manipulada) la variación del flujo de combustible que alimenta al quemador del precalcinador $\Delta u(t)$, y como variable de salida la variación de temperatura en el precalcinador $\Delta y(t)$.

Este proceso se encuentra afectado por diferentes perturbaciones, entre las que se encuentran la variación del flujo de harina cruda que ingresa al precalcinador, la variación del poder calorífico del combustible, la temperatura del flujo de aire utilizado en la combustión, etc.

En la Fig. 1 se muestra el arreglo experimental realizado para la recolección de datos en condiciones de funcionamiento del precalcinador objeto de estudio en lazo abierto.

En la Fig. 2 se presentan los datos experimentales de entrada y salida obtenidos en tiempo real del proceso objeto de estudio utilizando como señal de entrada una señal binaria pseudo aleatoria (PRBS), la cual se considera como una señal excitante persistente en un amplio rango de frecuencia [37]. El periodo de muestreo seleccionado fue de $T_s = 60$ s. En la Fig. 2 se muestra además la división realizada de los datos, en datos de estimación y datos de validación (izquierda y derecha de la línea vertical roja, respectivamente).

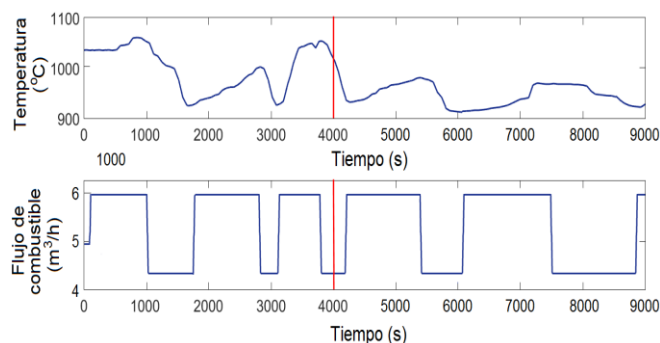


Fig. 2. Datos de entrada/salida del experimento con señal PRBS.

Utilizando la caja de herramientas computacionales de identificación de sistemas de Matlab se evaluaron diferentes estructuras de modelos discretos (ARMAX, ARX, OE y BJ) y se estimaron los parámetros de dichas estructuras utilizando el método de predicción de errores (PEM) [37], con el objeto de determinar el modelo que mejor se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente en base al índice de desempeño (FIT). El índice de desempeño (FIT) representa una medida cuantitativa de la calidad del modelo y se obtiene en base a la norma de los errores residuales [37], tal como se muestra en la Tabla I.

Como resultado se obtuvo que el modelo en tiempo discreto con estructura ARMAX de cuarto orden y retardo de tiempo de 540 s fue el que presentó el mejor FIT . Este modelo se representa mediante la siguiente expresión:

$$y(t) = \frac{B(q)^{-1}}{A(q)^{-1}} q^{-k} u(t) + \frac{C(q)^{-1}}{A(q)^{-1}} e(t), \quad (1)$$

donde:

$$A(q)^{-1} = 1 - 1.783q^{-1} + 0.0356q^{-2} + 1.729q^{-3} - 0.548q^{-4}, \quad (2)$$

$$B(q)^{-1} = 19.91q^{-1} - 46.14q^{-2} + 33.1q^{-3} - 6.84q^{-4}, \quad (3)$$

$$C(q)^{-1} = 1 - 1.164q^{-1} - 0.109q^{-2} + 0.566q^{-3} - 0.293q^{-4}, \quad (4)$$

k es el número de periodos de muestreo de retardo de tiempo del proceso. Considerando que la magnitud del retardo de tiempo del proceso es de 540 s y que el periodo de muestreo es $T_s = 60$ s, se obtiene que $k = 9$.

TABLA I
RESULTADOS COMPARATIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DE MODELOS

Estructura (FIT)	na	nb	nc	nd	nf	nk
ARMAX (90.87%)	4	4	4	-	-	9
BJ (89.83%)	-	4	4	4	4	1
ARX (87.80%)	4	4	-	-	-	10
OE (65.67%)	-	2	-	-	2	1

En la Fig. 3 se muestran los resultados del procedimiento de validación del modelo (1) utilizando el método de validación cruzada y el índice de desempeño (FIT) incorporados en la caja de herramientas de identificación de sistemas de Matlab. De la Fig. 3 se observa que el modelo obtenido describe con un elevado grado de adecuación ($FIT=90.87\%$) el comportamiento dinámico del proceso objeto de estudio.

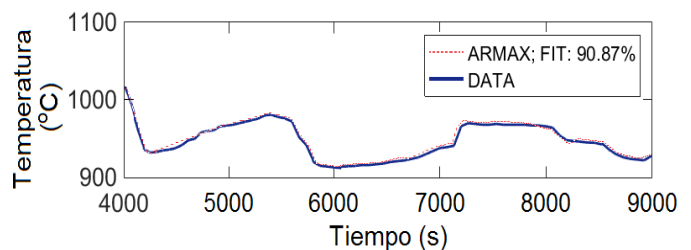


Fig. 3. Resultados de la validación del modelo matemático obtenido.

A continuación, se convierte el modelo en tiempo discreto anterior en un modelo equivalente en tiempo continuo de la temperatura en el precalcinador, que se utilizará en la Sección 4 en el diseño del controlador PI así como en la simulación del sistema controlado.

Se indica que, aunque un modelo discreto contiene menos información que un modelo continuo, es posible reconstruir toda la información continua a partir de la discreta bajo ciertas condiciones. En el tipo de aplicación considerado en este trabajo se verifica que: 1) tanto el modelo continuo de la dinámica del proceso linealizado como el discreto identificado son lineales e invariantes con el tiempo y 2) un computador genera la señal de entrada al proceso suministrando datos a un convertidor digital-analógico cuya salida actúa sobre la válvula de control del flujo de combustible, por lo que la transformación de la secuencia discreta del computador a la señal de control continua responde a un retenedor de orden cero, siendo posible reconstruir completamente la señal de entrada al sistema. Supuesto el cumplimiento de las dos condiciones anteriores (que son bastante habituales) se demuestra [41] que $G(s)$ puede reconstruirse perfectamente a partir de $G(z)$ si se verifica que las partes imaginarias ω_i de todos los N polos, $1 \leq i \leq N$, del sistema continuo verifican que $\omega_i < \pi / T$, $\forall i$, siendo T el periodo de muestreo de la salida y del retenedor de la entrada. Este re-

sultado también se desarrolló en [42] para obtener el modelo de estado de un sistema continuo a partir de un modelo de estado discreto identificado. En particular, la condición $\omega_i < \pi / T$, $\forall i$ no supondría ninguna restricción si todos los polos del sistema continuo fueran reales, en cuyo caso se podría reconstruir $G(s)$ completamente a partir de $G(z)$ sin tener que imponer ninguna condición adicional (aparte de las dos condiciones generales del párrafo anterior). Las respuestas obtenidas en el presente trabajo ante las señales de test muestran oscilaciones de una pulsación muy inferior al límite π / T por lo que puede decirse – a partir de [41], [42] – que el modelo continuo obtenido a partir de $G(z)$ haciendo la hipótesis de un retenedor de orden cero es una reconstrucción exacta.

Por tanto, de la expresión (1) utilizando la función “d2c” de Matlab con la opción “zoh” (retención de orden cero en la entrada se obtuvo el modelo equivalente en tiempo continuo de la temperatura en el precalcinador, el cual se representa mediante la siguiente función de transferencia de cuarto orden con retardo de tiempo dominante:

$$G(s) = \frac{6.33s^3 + 1.62s^2 + 0.072s + 0.003}{s^4 + 0.59s^3 + 0.08s^2 + 0.002s + 0.00001} e^{-540s} \quad (5)$$

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR SFC-SP

Para el control de la temperatura en el precalcinador se propone un controlador *SFC-SP*, el cual se caracteriza por utilizar un controlador por realimentación de estado (*SFC*) para reducir los efectos de las perturbaciones externas [43], así como un predictor de Smith (*PS*) para compensar los efectos del retardo dominante de tiempo del proceso [20], [44]. La Fig. 4 muestra el diagrama del sistema de control por realimentación de estado en tiempo continuo convencional, conformado por el proceso dinámico lineal, el controlador *SFC* convencional (integrado por K - matriz de ganancias de realimentación del estado, y por F - ganancia de precompensación), la señal de entrada $v(t)$, y la perturbación $d(t)$.

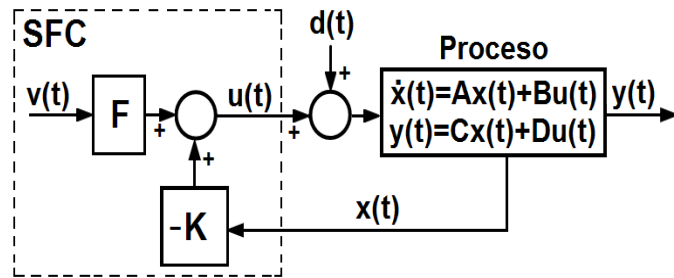


Fig. 4. Sistema de control por realimentación de estado convencional.

Un elemento esencial en el diseño de un controlador son las especificaciones de desempeño que debe cumplir [45], [46]. Entre las especificaciones de desempeño más importantes que debe garantizar el controlador *SFC* se encuentran: 1) la estabilidad del sistema de control; 2) el seguimiento de la salida del proceso $y(t)$ a la señal de referencia $r(t)$ con error de estado estacionario $e_{ss}(t) = 0$; 3) la compensación de los efectos negativos de las perturbaciones. Sin embargo, es notorio señalar

que el controlador *SFC* no posibilita controlar de forma efectiva procesos con retardos de tiempos dominantes, ni garantiza $e_{ss}(t) = 0$ [43]. Es por ello que en este trabajo se desarrolla una modificación del controlador *SFC* convencional para el control efectivo de la temperatura en el precalcinador del horno objeto de estudio, la cual se basa en la utilización de un *SP* y de un controlador *PI*.

El *SP* es una estructura de control utilizada en el control de procesos con retardos de tiempos dominantes, la cual se encuentra conformada por un controlador $C(s)$ convencional y un predictor [20]. El predictor incluye un modelo rápido del proceso $G(s)$ (sin retardo de tiempo), que posibilita calcular la predicción de la salida del proceso en el tiempo t , así como un modelo completo del proceso $G(s)e^{-\tau s}$ que incluye el retardo de tiempo (τ), el cual se utiliza para corregir los efectos de los errores de modelado y de las perturbaciones [21]. La función de transferencia del sistema de control con *SP* en lazo cerrado se representa mediante la expresión [21]:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G(s)} e^{-\tau s}, \quad (6)$$

donde $R(s)$ es la señal de referencia y $P(s)$ el proceso real.

Para el diseño del controlador *SFC-SP* se requiere un modelo en espacio de estado del proceso objeto de estudio. Este modelo se obtiene en este trabajo a partir de (5) utilizando la función de Matlab de conversión de modelos de continuos a modelos en espacio de estado y considerando que el retardo de tiempo del proceso afecta solamente a la señal de salida (variación de la temperatura en el precalcinador). El modelo en espacio de estado se representa mediante la expresión:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t - \tau) + Du(t), \end{aligned} \quad (7)$$

donde $x(t)$ es el vector de estado, $u(t)$ el vector de entrada e $y(t)$ el vector de salida; $\tau = 540s$ es el retardo de tiempo; A es la matriz de estado, B la matriz de entrada, C la matriz de salida y D la matriz de transmisión directa ($D = 0$):

$$A = \begin{bmatrix} -0.5998 & -0.1654 & -0.06624 & -0.01955 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03125 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$B = [4 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (9)$$

$$C = [1.583 \ 0.8143 \ 0.5814 \ 0.8192]. \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el *SP* utiliza un modelo del proceso sin retardo de tiempo, y que el retardo de tiempo no cambia los parámetros del modelo, solamente influye en retardar la salida del proceso debido a que agrega fase negativa [21], de (7) se obtiene el modelo del proceso sin retardo de tiempo:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y_{m1}(t) &= Cx(t).\end{aligned}\quad (11)$$

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de temperatura en el precalcinador del horno rotatorio objeto de estudio con el controlador *SFC-SP* propuesto, donde $y_{m1}(t)$ es la salida del modelo sin retardo de tiempo, e $y_{m2}(t)$ es la salida del modelo retardada.

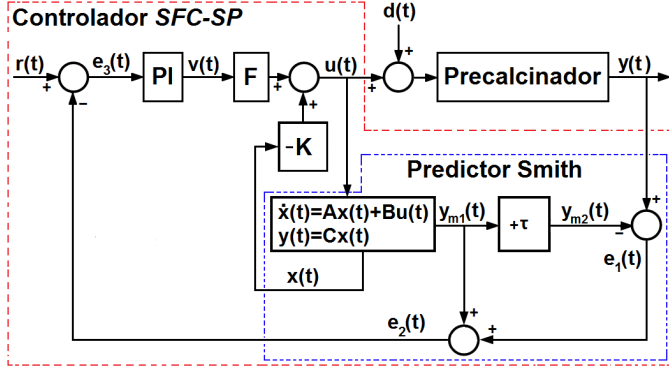


Fig. 5. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura en el precalcinador del horno rotatorio con controlador *SFC-SP*.

Es sabido que se consigue un error en régimen permanente nulo tanto en el seguimiento de una consigna escalón como en el rechazo de una perturbación escalón aplicada a la entrada del proceso si se añade una acción integral a un *SFC* en la cadena directa [47]. Por tanto, para garantizar un error de estado estacionario de la señal $e_3(t) = 0$ en el seguimiento de una consigna escalón así como un error nulo ante una perturbación escalón en la entrada del proceso, se añadió un bloque con acción integral al controlador *SFC-SP* [47]. Concretamente, se añadió un controlador *PI* que, además de incorporar dicha acción integral, presenta dos ganancias cuyo ajuste permite mejorar las prestaciones del sistema. Dicho ajuste se realiza en esta Sección mediante técnicas en el dominio de la frecuencia [48]. Por consiguiente, se tiene que:

$$v(t) = K_C e_3(t) + \frac{K_C}{T_I} \int e_3(t) dt, \quad (12)$$

donde K_C es la ganancia proporcional, y T_I es el tiempo integral. Considerando que el vector de estado $x(t)$ contiene la información necesaria para predecir el comportamiento futuro del sistema, la ley de control por realimentación de estado se representa mediante la expresión:

$$u(t) = -Kx(t) + Fv(t). \quad (13)$$

Considerando (12) de (13) se obtiene:

$$u(t) = -Kx(t) + FK_C e_3(t) + \frac{FK_C}{T_I} \int e_3(t) dt. \quad (14)$$

Por consiguiente, el sistema en lazo cerrado se describe como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B(-Kx(t) + Fv(t)) \\ &= (A - BK)x(t) + BFv(t).\end{aligned}\quad (15)$$

Los polos del sistema en lazo cerrado son las raíces de la ecuación característica:

$$\det(sI - (A - BK)) = 0, \quad (16)$$

donde I es la matriz identidad.

La ley de control por realimentación de estado consiste en seleccionar las ganancias $k_{i,j}$ de la matriz K de forma tal que las raíces de la ecuación característica del sistema en lazo cerrado se encuentren en las ubicaciones deseadas en el plano complejo, garantizando de esta forma la estabilidad del sistema. Suponiendo que los polos deseados del sistema en lazo cerrado se representan como p_1, p_2, \dots, p_n , el polinomio característico en lazo cerrado deseado se describe como:

$$\begin{aligned}\alpha_c(s) &= (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n) \\ &= s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \alpha_{n-2}s^{n-2} + \dots + \alpha_1s + \alpha_0,\end{aligned}\quad (17)$$

donde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ son los coeficientes de la ecuación característica deseada.

Los polos del sistema en lazo abierto son los siguientes: $p_1 = -1.0451 + 0.0000i$, $p_2 = -0.1255 + 0.0000i$, $p_3 = -0.0145 + 0.0086i$, y $p_4 = -0.0145 - 0.0086i$. Los polos en lazo cerrado deseados del sistema se seleccionaron en base a las especificaciones de las características deseadas de diseño: frecuencia natural del sistema $\omega_n = 0.00625$ rad/s, coeficiente de amortiguamiento $\xi = 0.64$, máximo sobreimpulso $M_p < 5\%$, tiempo de establecimiento $t_s < 1000$ s. Los polos en lazo cerrado deseados del sistema son los siguientes: $p_{LC1} = -2 + 0.4641i$, $p_{LC2} = -2 - 0.4641i$, $p_{LC3} = -10$ y $p_{LC4} = -10.5$.

El diseño del controlador *SFC* se basa en determinar la matriz de ganancias de realimentación de estado K tal que:

$$\det(sI - A + BK) = s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \alpha_{n-2}s^{n-2} + \dots + \alpha_1s + \alpha_0, \quad (18)$$

Para la obtención de la matriz de ganancias de realimentación de estado se utilizó la fórmula de Ackerman, que posibilita calcular K en base a la siguiente expresión [43]:

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 1] [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]^{-1} \phi(A), \quad (19)$$

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] [B \ AB \ A^2B \ A^3B]^{-1} \phi(A) \quad (20)$$

donde

$$\phi(A) = A^n + \alpha_{n-1}A^{n-1} + \alpha_{n-2}A^{n-2} + \dots + \alpha_1A + \alpha_0I, \quad (21)$$

Con la ayuda de la función “acker” de Matlab se obtuvo:

$$K = [-0.14995 \ -0.04135 \ -0.01656 \ -0.00478]. \quad (22)$$

Utilizando el método de diseño de controladores PI en el dominio de la frecuencia basado en el margen de fase, ver por ejemplo [17], [45], [46] se obtuvo $K_c = 4.2$, $T_i = 0.56$ s. Además se determinó que $F = 0.25$.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el propósito de evaluar el desempeño y la precisión del controlador $SFC-SP$ diseñado para el control de la temperatura en el precalcinador del horno objeto de estudio se desarrollaron algunas pruebas basadas en simulaciones de escenarios reales de funcionamiento del sistema de control utilizando el modelo en espacio en estado (7) del proceso objeto de estudio.

La primera prueba consistió en verificar la capacidad del controlador $SFC-SP$ de seguimiento a variaciones en la señal de referencia $r(t)$. En la Fig. 6 se muestran la respuesta temporal del sistema de control diseñado, así como la señal de control frente a un cambio (en el instante de tiempo $t = 1000$ s) en la señal de referencia de $(900$ a $950)^\circ\text{C}$. De la Fig. 6 se observa que la temperatura en el precalcinador alcanza el nuevo valor de referencia en un periodo de tiempo aproximado de 980 s, sin sobreimpulso y con un error de estado estacionario $e_3(t) = 0$.

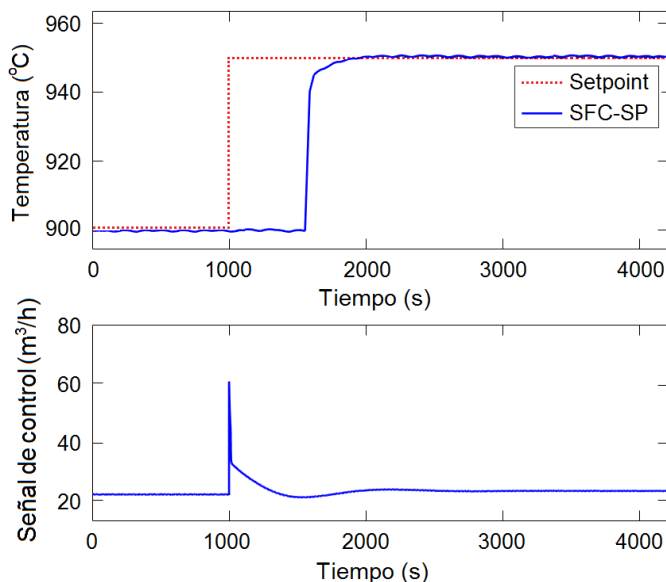


Fig. 6. Respuesta temporal del sistema de control de temperatura en el precalcinador con controlador $SFC-SP$ frente a un cambio en la señal de referencia.

Estos resultados muestran que el controlador $SFC-SP$ diseñado tiene la capacidad suficiente para seguir de forma efectiva la variación en la señal de referencia en un periodo de tiempo menor a 1000 s, y por consiguiente, se encuentra dentro de los límites establecidos de operación nominal de la temperatura en el precalcinador.

Considerando que actualmente el controlador PI es el más utilizado para el control de temperatura en el precalcinador de los hornos rotatorios vía seca [10], [15], la segunda prueba consistió en analizar comparativamente la capacidad de los controladores $SFC-SP$ vs PI de seguimiento a variaciones en la señal de referencia, así como de rechazo al efecto negativo

de perturbaciones externas en entornos cercanos a las condiciones de operación nominal del precalcinador objeto de estudio. En las simulaciones del proceso con controlador PI se utilizó el modelo equivalente en tiempo continuo (5).

El controlador PI se diseñó en el dominio de la frecuencia utilizando el método del margen de fase, ver por ejemplo [17], [47]. Los parámetros obtenidos de ajuste del controlador PI son $K_c = 0.00575$, y $K_i = 0.00008225$.

En la Fig. 7 se muestran las respuestas temporales del sistema de control con controladores $SFC-SP$ vs PI frente a un cambio en el instante de tiempo $t = 1000$ s en la señal de referencia de $(920$ a $945)^\circ\text{C}$. En dicha figura se observa que con el controlador $SFC-SP$ la temperatura en el precalcinador alcanza el nuevo valor de referencia en un periodo de tiempo aproximado de 980 s, mientras que con el PI la nueva referencia se alcanza en un periodo de tiempo de 2300 s, es decir en un intervalo de tiempo 2.34 veces mayor.

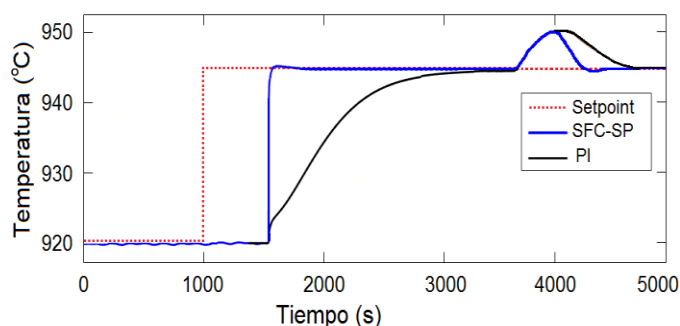


Fig. 7. Resultados comparativos del desempeño de los controladores $SFC-SP$ vs PI frente a variaciones en la señal de referencia, y de perturbaciones externas.

De la Fig. 7 se observa además que en el instante de tiempo $t = 3800$ s se origina una perturbación externa $d(t)$ tipo escalón debido a un incremento en la magnitud de apertura de la válvula que regula el flujo de combustible al quemador del horno rotario (ver Fig. 1), ocasionando un aumento en dicho flujo de combustible de 5 m^3/h . Como resultado los gases calientes que llegan al precalcinador (desde el horno rotatorio) aumentan su temperatura y provocan una variación en la temperatura del precalcinador de $(945$ a $950)^\circ\text{C}$. El controlador $SFC-SP$ rechaza totalmente este efecto negativo en un periodo de tiempo aproximado de 500 s, mientras que el PI lo rechaza en un periodo de tiempo aproximado de 1050 s, es decir en un intervalo de tiempo 2.1 veces mayor.

En la Fig. 8 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control con controladores $SFC-SP$ vs $SP-PI$ (predicador de Smith con controlador PI) vs PI frente a un cambio en el instante de tiempo $t = 1000$ s en la señal de referencia de $(910$ a $947.5)^\circ\text{C}$. De la figura se observa que la mejor respuesta se obtiene con el controlador $SFC-SP$.

Estos resultados muestran que el controlador $SFC-SP$ diseñado tiene la capacidad suficiente para rechazar de forma efectiva los efectos negativos de las perturbaciones externas dentro de los límites establecidos de operación nominal de la temperatura en el precalcinador.

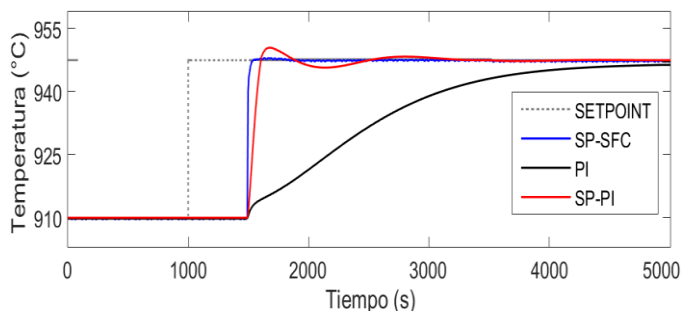


Fig. 8. Resultados comparativos del desempeño de los controladores *SFC-SP* vs *SP-PI* vs *PI* frente a variaciones en la señal de referencia

Para evaluar el desempeño de los controladores diseñados se utilizaron los índices de desempeño de la integral del error absoluto (*IAE*) y del esfuerzo de la señal de control (*EU*), que se representan mediante las siguientes expresiones [17]:

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |e_3(\sigma)| d\sigma, \quad (23)$$

$$EU = \int_{t_0}^{t_f} \left| \frac{du(\sigma)}{d\sigma} \right| d\sigma, \quad (24)$$

donde t_0 es el instante de tiempo de comienzo del ensayo y t_f es el tiempo en el que el error $e_3(t) = 0$.

En la Tabla II se exhiben los resultados comparativos de los índices de desempeño *IAE* y *EU*, definidos en (23), (24), del sistema de control de la temperatura en el precalcinador del horno objeto de estudio con los controladores *SFC-SP* y *PI*, considerando el efecto de las perturbaciones. De nuevo, los resultados obtenidos muestran que el mejor desempeño se obtiene con el controlador *SFC-SP* debido a que exhibe un menor *IAE* con un menor esfuerzo en el control (*EU*).

TABLA II
ÍNDICES DE DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES *SFC-SP* Y *PI*

CONTROLADOR	IAE	EU
PI	14 200	77
<i>SFC-SP</i>	12 500	21

Por consiguiente, el controlador diseñado *SFC-SP* posibilita obtener mejoras significativas en el control de la temperatura en el precalcinador del horno objeto de estudio, lo que implica producir cemento de mayor calidad con un menor consumo energético, y con una menor emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

V. CONCLUSIONES

En base a la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas sobre datos experimentales en tiempo real se obtuvo un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio de cemento vía seca. El modelo obtenido es de cuarto orden y presenta retardo de tiempo dominante.

Se diseñó un controlador *SFC-SP* para el control efectivo de

la temperatura en el precalcinador del horno de cemento objeto de estudio, que se distingue por utilizar un controlador por realimentación de estado (*SFC*) modificado añadiendo un término *PI* para rechazar los efectos negativos de las perturbaciones externas, y un predictor de Smith (*SP*) para compensar los efectos del retardo de tiempo del proceso.

Los resultados obtenidos mediante simulación revelaron que el controlador *SFC-SP* combinado con el *PI* diseñado exhibe la capacidad suficiente para seguir de forma efectiva las variaciones en la señal de referencia y rechazar los efectos negativos de las perturbaciones externas en periodos de tiempo que se encuentran dentro de los límites establecidos de operación nominal de la temperatura en el precalcinador.

Los resultados de la evaluación comparativa del desempeño de los controladores *SFC-SP* vs *PI* mediante los índices de la integral del error absoluto (*IAE*) y del esfuerzo de la señal de control (*EU*) mostraron que el mejor comportamiento se obtiene con el controlador *SFC-SP*.

Es importante destacar que en este trabajo se presentan las primeras experiencias relacionadas con el diseño de un controlador *SP-SFC* para el control efectivo de la temperatura en el precalcinador de un horno rotatorio de cemento vía seca, el cual, debido a su precisión, garantiza la producción de cemento de calidad con un menor consumo de combustible y una menor emisión de gases contaminantes del medio ambiente.

La siguiente etapa de nuestra investigación consiste en la implementación del controlador diseñado en el precalcinador del horno rotatorio vía seca de la empresa Cementos Lima.

REFERENCIAS

- [1] P. V. Nidheesh, and M. S. Kumar, "An overview of environmental sustainability in cement and steel production", *Journal of Cleaner Production*, vol. 231, pp. 856–871, 2019.
- [2] A. Atmaca, and R. Yumrutas, "Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, pp. 435–444, 2014.
- [3] O. Hernández, P. Ortiz and J. Herrera, "Fractional PID controller with LQR proportional action applied to fractional model of cement rotary kiln," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 37–42, Jan. 2015.
- [4] J. Salcedo Hernández, R. Rivas-Perez, and J. J. Sotomayor Moriano, "Design of a generalized predictive controller for temperature control in a cement rotary kiln," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 4, pp. 1015–1021, Apr. 2018.
- [5] K. S. Stadler, J. Poland, and E. Gallestey, "Model predictive control of a rotary cement kiln," *Control Engineering Practice*, vol. 19, pp. 1–9, 2011.
- [6] O. Hernández, P. Ortiz, and J. Herrera, "Cement rotary kiln model using fractional identification," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 87–92, Feb. 2014.
- [7] J. Salcedo Hernández, R. Rivas-Perez, and J. J. Sotomayor Moriano, "Model reference adaptive temperature control of a rotary cement kiln," in *Proc. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America*, Lima, Peru, Sep. 2018.
- [8] S. M. Zanoli, C. Pepe, and M. Rocchi, "Improving performances of a cement rotary kiln: a model predictive control solution," *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 262–267, Apr. 2016.
- [9] S. Fellaou, A. Harnoune, M. A. Seghra, and T. Bounahmidi, "Statistical modeling and optimization of the combustion efficiency in cement kiln precalciner," *Energy*, vol. 155, pp. 351–359, 2018.
- [10] P. A. Alsop, *The Cement Plant Operations Handbook*, Sixth ed., Surrey, UK: Tradeship Publication LTD, 2014.
- [11] J. Salcedo Hernández, and R. Rivas-Perez, "Model based predictive

- control of temperature in a cement rotatory kiln,” *Electro-Electrónica*, vol. 34, no. 2, pp. 52–60, Dec. 2010.
- [12] K. S. Stadler, B. Wolf, and E. Gallestej, “Precalciner control in the cement production process using MPC,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 11, pp. 201–206, 2007.
- [13] F. N. Koumboulis, and N. D. Kouvakas, “Indirect adaptive neural control for precalcination in cement plants,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 60, pp. 325–334, 2002.
- [14] D. C. Tsamatsoulis, “Simplified modeling of cement kiln precalciner,” *International Journal of Materials*, vol. 3, pp. 69–73, 2016.
- [15] D. C. Tsamatsoulis, and G. Zlatev, “PID parameterization of cement kiln precalciner based on simplified modeling,” *International Journal of Neural Networks and Advances Applications*, vol. 3, pp. 41–46, 2016.
- [16] B. Yang, and D. Cao, “Action-dependent adaptive critic design based neurocontroller for cement precalciner kiln,” *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 1, pp. 60–67, 2009.
- [17] K. Åström, and T. Hagglund, *Control PID Avanzado*, Madrid, España: Pearson Educación S.A., 2009.
- [18] E. M. Calderon, R. Rivas, and J. J. Sotomayor, “Design of an adaptive neuro-fuzzy controller of an irrigation main canal pool,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no.2, pp. 471–476, Feb. 2016.
- [19] R. Rivas-Perez, V. Feliu-Battle, F. Castillo-García, L. Sanchez-Rodríguez, and A. Linares-Saez, “Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal,” *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 5, no. 1, pp. 23–42, Jan. 2014.
- [20] O. J. M. Smith, “Closed control of loops with dead-time,” *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp. 217–219, 1957.
- [21] J. E. Normey-Rico, and E. F. Camacho, *Control of Dead-time Processes*, London, UK: Springer, 2007.
- [22] R. Sanz, P. García, and P. Albertos, “A generalized Smith predictor for unstable time-delay SISO systems,” *ISA Transactions*, vol. 72, pp. 197–204, 2018.
- [23] V. Feliu-Battle, and R. Rivas-Perez, “Smith predictor based fractional-order integral controller for robust temperature control in a steel slab reheating furnace,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, pp. 1–14, 2019.
- [24] I. O. Benítez, R. Rivas, V. Feliu, L. P. Sánchez, and L. A. Sánchez, “Fuzzy gain scheduled Smith predictor for temperature control in an industrial steel slab reheating furnace,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4439–4447, Nov. 2016.
- [25] I. O. Benítez, R. Rivas, V. Feliu, and F. J. Castillo, “Temperature control based on a modified Smith predictor for injectable drug formulations,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 4, pp. 1041–1047, April 2015.
- [26] S. Alcántara, A. Ibeas, J. A. Herrera, R. Vilanova, and C. Pedret, “Multi-model Smith predictor based control of multivariable systems with uncertain bounded external delays,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 7, no.1, pp. 87–92, Jan. 2009.
- [27] R. Rivas-Perez, T.G. Cao, C. Franco-Parellada, and V.E. Prokofiev, “Automatic control systems of time delay plants,” *Control, Cibernética y Automatización*, vol. 20, no. 1, pp. 24–26, Jan. 1987.
- [28] Z. J. Palmor, *The Control Handbook, Time Delay Compensation: Smith Predictor and its Modifications*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- [29] T. G. Kao, M. Nguyen, and R. Rivas-Perez, “Adaptive control of a time delay plant using a searchless model-reference self-tuning system,” *Automation and Remote Control*, vol. 49, no. 12, Part 2, pp. 1620–1627, Dec. 1989.
- [30] D. Fernandes, R. Almeida, T. Guedes, A. J. Sguarezi Filho, and F. F. Costa, “State feedback control for DC-photovoltaic systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 794–801, 2017.
- [31] A. Abdo-Allah, T. Iqbal, and K. Pope, “Modeling, analysis, and state feedback control design of a multizone HVAC system,” *Journal of Energy*, vol. 2018, Article ID 4303580, pp. 1–11, 2018.
- [32] X. Long, S. Ren, and P. Zheng, Delayed state feedback control for milling process, *Procedia IUTAM*, vol. 22, pp.115–122, 2017.
- [33] H. S. Jeong, and C. W. Lee, “Time delay control with state feedback for azimuth motion of the frictionless positioning device,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 2, no. 3, Sep. 1997.
- [34] F. J. Castillo-García, V. Feliu-Battle, R. Rivas-Perez, and L. Sanchez-Rodríguez “Time domain tuning of a fractional order $PI\alpha$ controller combined with a Smith Predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 15049-15054, 2011.
- [35] J.O. Gray, “State variable feedback with linear predictor for systems with dead time,” *Electronics Letters*, vol 7, no. 12, pp 335-337, 1971.
- [36] M. Delgado, and C. Durand, *Reporte de Sostenibilidad 2014 Unión Andina de Cemento S.A.A.*, Lima, Perú: Rayo Verde S.A.C., 2014.
- [37] L. Ljung, *System Identification: Theory for de User*, New Jersey, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
- [38] Y. Hernández, V. Feliu, and R. Rivas, “Artificial neural network based system identification of an irrigation main canal pool,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 9, pp. 1595–1600, Sep. 2017.
- [39] W. Piña, V. Feliu, and R. Rivas, “Direct continuous-time system identification of the purification process of the nimotuzumab, a humanized monoclonal antibody,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 31–37, Jan. 2018.
- [40] S. N. Calderon Valdez, V. Feliú-Battle, and R Rivas-Perez, “Fractional-order mathematical model of an irrigation main canal pool,” *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(3), e0212, Sep. 2015.
- [41] V. Feliu, “A transformation algorithm for the estimation of system Laplace-transform from sampled-data,” *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, vol. 16, no. 1, pp. 168-173, Jan-Feb. 1986.
- [42] V. Feliu, J.A. Cerrada, and C. Cerrada, “An algorithm to compute the continuous state model from its equivalent discrete model,” *Control Theory and Advanced Technology*, vol. 4, no 2, pp. 231-241, Jun. 1988.
- [43] R. Sánchez-Peña, and M. Szaier, *Robust Systems Theory and Applications*, New York, NY, USA: Wiley, 1998.
- [44] V. Feliu, R. Rivas, F. Castillo, and L. Sánchez Rodríguez, “Smith predictor based robust fractional order control. Application to water distribution in a main irrigation canal pool,” *Journal of Process Control*, vol. 19, no. 3, pp. 506-519, Mar. 2009.
- [45] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, fifth edition, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2010.
- [46] R. Rivas-Perez, F. Castillo-García, J. Sotomayor-Moriano, and V. Feliu-Battle, “Control robusto de orden fraccionario de la presión del vapor en el domo superior de una caldera bagacera,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 11, no. 1, pp. 20–31, Jan. 2014.
- [47] T. Kailath, *Linear Systems*, New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1980.
- [48] V. Feliu-Battle, R. Rivas-Perez, L. Sanchez-Rodríguez, F.J. Castillo-García, and A. Linares Saez, “Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 15535-15540, Jul.. 2008.



José Salcedo Hernández received the M.Sc. degree in Control Engineering and Automation from Pontifical Catholic University of Peru, Peru, in 2010. He is currently pursuing the Ph.D. degree in Automatic Control Engineering at the same university. His research interest includes adaptive, robust and intelligent predictive control of complex dynamic processes, control of mining, and hydraulic processes.



Vicente Feliu Battle received his M.Sc. (with honors) in Industrial Engineering and the Ph.D. degree from Polytechnic University of Madrid, Spain in 1979 and 1982, respectively. He also received the M.Sc. degree in Physics in 1986. Currently he is the leading of Automation and Robotics group at the same university. He is senior member of the IEEE and a member of IFAC.

His research interests include multivariable and digital control systems, fractional dynamics and control, kinematic and dynamic control of rigid and flexible robots, and computer vision for robots.



Raul Rivas-Perez received his Engineering and the M.Sc (with honors) degrees in Automatic Control from the Odessa Polytechnic University, Ukraine in 1979, and the Ph.D. and the Doctor Science (D.Sc) degrees from the Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation of Ukrainian Academy of Agrarian Sciences in 1984 and 1990 respectively. He has been a full-time professor at the Havana Technological University since 1992. Currently he is the leading of Advanced Control Systems Group at the same university. His research interests include identification and control of complex and uncertain dynamic plants, fractional order dynamics and control, system identification for robust control, control of large time-delay systems.