

# CONTROL BASADO EN OPTIMIZACIÓN DE UN SECADOR ROTATORIO DIRECTO

## OPTIMIZATION BASED CONTROL OF A DIRECT ROTARY DRYER

HÉCTOR VALDÉS-GONZÁLEZ

*PhD, Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, hvaldes@unab.cl*

JOSE LUIS SALAZAR

*PhD, Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, jlsalazar@unab.cl*

LORENZO REYES-BOZO

*PhD, Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, lreyes@unab.cl*

EDUARDO VYHMEISTER

*PhD, Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, eduardo.vyhmeister@gmail.com*

MARCO GÓMEZ-VARELA

*Escuela de Industrias, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile, marcoa.gomezvarela@gmail.com*

FRANCISCO CUBILLOS MONTECINOS

*PhD, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile, francisco.cubillos@usach.cl*

Recibido para revisar Mayo 20 de 2011, aceptado Diciembre 2 de 2011, versión final Diciembre 19 de 2011

**RESUMEN:** Este trabajo presenta el control de un secador rotatorio directo basado en optimización no lineal. Esta metodología permite auto-sintonizar dinámicamente un controlador PI o PID, mejorando claramente el control del proceso respecto de la sintonización clásica. El control del proceso se realiza a través de simulación computacional vía Matlab y su verificación a través de un proceso piloto, lo que permite apreciar la potencialidad de la sintonía dinámica que se propone. Los resultados, tiempo de respuesta y dinámica de control posibilitan que investigación futura pueda escalar esta propuesta desde el laboratorio a procesos industriales.

**PALABRAS CLAVE:** controlador PID; optimización no lineal; sintonía dinámica; control predictivo.

**ABSTRACT:** This paper presents the control of a direct rotary dryer based on nonlinear optimization. This methodology allows the dynamic self-tuning of PI or PID controller, clearly improving process control over the classic tuning approach. Process control is done through Matlab via computer simulation and verification through a pilot process, which allows us to appreciate the potential of the proposed dynamic tuning. The results, response time and dynamic control allow us to scale future research from the laboratory (pilot scale) to industrial processes.

**KEYWORDS:** PID controller; nonlinear optimization; dynamic tuning; predictive control.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los secadores rotatorios se emplean para secar grandes volúmenes de material particulado que son económicamente significativos en producción, tales como, harina de pescado y concentrado de mineral [1]. La complejidad de los fenómenos combinados de transferencia de calor y materia que ocurren en su interior hacen que la operación y control de un secador rotatorio sea un gran desafío. En este sentido, la ingeniería de control de procesos juega un papel clave en la mejora de la operación y calidad de

producto, sin embargo, los largos tiempos de respuesta del proceso y tiempos muertos, la composición variable de la materia prima y la falta de instrumentos adecuados para medir en línea son factores que impiden el desarrollo y aplicación de un sistema de control eficaz para controlar secadores rotatorios [2-4]. Se busca que un proceso de secado sea óptimo, en este sentido, entendemos por ello que se maximice la producción con la calidad especificada, utilizando un mínimo de energía, lo cual está estrechamente relacionado con la eficiencia energética del secador empleado y su control [5].

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar la factibilidad de utilización de una estrategia de optimización no lineal para obtener auto-sintonía de controladores PID, cuantificando la respuesta del lazo de control realimentado y probando sus resultados en un proceso no lineal.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Controlador PI/PID auto-sintonizado

El controlador tipo PI o PID auto-sintonizado (en adelante PI/PID) basado en optimización no lineal, utiliza un enfoque de horizonte de predicción y se basa en un modelo de referencia [6-8]. De este modo, frente a un cambio en la referencia del lazo de control, los parámetros  $K_c$  (ganancia),  $T_i$  (tiempo integral) y  $T_d$  (tiempo derivativo) óptimos se determinan instantáneamente a través del método de optimización tipo Quasi-Newtoniano (BFGS) que permiten diseñar un controlador PI/PID óptimo para un lazo de control realimentado.

En la Figura 1, podemos observar un esquema donde se muestra el funcionamiento del algoritmo de control, en que  $J(\psi)$  es la función objetivo,  $y(t)$  es la salida medida del proceso,  $e(t)$  es el error entre la referencia y la salida medida, PI/PID es la estructura del controlador, además  $K_c$  es la ganancia,  $T_i$ , el tiempo integral y  $T_d$  el tiempo derivativo asociado a un controlador PID. El algoritmo de optimización se integra al lazo de control, entregando los valores óptimos para  $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ , según sea la respuesta dinámica de los sistemas.

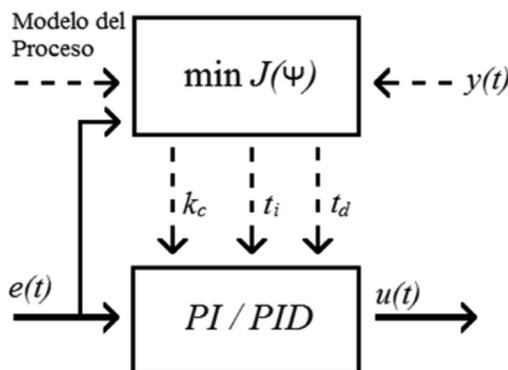


Figura 1. Diagrama de bloques para el método de auto-sintonización propuesto

### 2.2 Diseño del controlador

Se trabaja bajo el supuesto que un controlador PI/PID robusto, puede ser diseñado a través de la formulación de un problema que permita obtener dinámicamente los parámetros óptimos  $K_c$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , a través de la optimización numérica en un horizonte de tiempo preestablecido  $\ell$ , tal como se describe en la Figura 1. Es decir, resolver el problema (1) para un vector óptimo  $\psi = [K_c, T_i, T_d]$ :

$$\text{Min } J(\psi) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\ell} (y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2 \quad (1)$$

Si el sistema asociado a la función objetivo  $J(\psi)$  es no lineal (donde  $\hat{y}(t)$  es la salida del modelo de referencia), en general no hay solución analítica conocida del problema de optimización planteado en (1). Una manera de resolver este problema es mediante optimización numérica tipo BFGS.

Problema de control en un horizonte de tiempo

Considérese el modelo genérico no lineal (2), donde  $f$  y  $g$  son funciones no lineales de un proceso típico, donde  $x(t)$   $x(t)$  representa el vector de estados del sistema,  $u(t)$   $u(t)$  el vector de entrada y donde  $\hat{y}(t)$  es la salida o el vector de medidas simulado del sistema.

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= f(x, u) \\ \hat{y}(t) &= g(x) \end{aligned} \quad (2)$$

Para el problema de control se propone que la salida del sistema sea predicha para ciertos instantes en un horizonte de tiempo indicado por  $\ell$  desde  $t_i, \dots, t_{i+\ell}$  donde  $t_i$  indica el tiempo actual del proceso. El objetivo del problema de control es proveer los valores óptimos de los parámetros  $K_c$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , para un controlador tipo PI/PID para  $t \leq t_{i+1}$ , usando el modelo de proceso (2) y el valor actual de la variable manipulada  $u(t_i) = \text{PI/PID}(e(t_i))$ , es decir (que permanecerá constante en el horizonte de tiempo),  $\rho_u(t) = (u(t_1), u(t_2) = u(t_1), \dots, u(t_{i+\ell}) = u(t_1))$ , esto para cada salida predicha  $\rho_y(t) = (y(t_1), \dots, u(t_{i+\ell}))$ . Un algoritmo que considera las salidas predichas  $\rho_y(t)$  puede ser considerado como un controlador óptimo. El componente clave de este algoritmo es la asignación  $(\rho_u(t), \rho_y(t)) \rightarrow \psi(t)$  que puede ser entendida como un conjunto de parámetros estimados para la configuración

de un controlador PID, y que es en definitiva un tipo de inversión del sistema dinámico asociado a la salida predicha durante el largo de horizonte predefinido  $\ell$ . Este conjunto sólo tiene un elemento, si y sólo si, el sistema (2) es controlable [7,9,10]. Se debe notar que el lazo de control debido a (2) puede ser difícil de estabilizar considerando la generalización de un sistema no lineal. Por lo tanto, y para efectos teóricos puramente, se supone que el modelo representado por (2) es perfectamente conocido y controlable. En este caso, la precisión del vector de estado  $\psi(t)$  depende del nivel de ruido en la medición de la salida en el tiempo  $t_i$ . Un buen controlador debe ser capaz de eliminar el efecto de este tipo de ruido. Si hay perturbaciones en los estados del sistema, es decir, variaciones inesperadas en una o más variables de estado, el papel de la auto-sintonización del algoritmo de control PI/PID rechazará estas perturbaciones tan pronto como sea posible.

### 2.3 Modelo dinámico de secador rotatorio

El modelado de un secador rotatorio incluye balances de masa y energía aplicados a un proceso que exhibe los efectos combinados junto al transporte de sólidos. Hay varios trabajos publicados que tratan el estado de equilibrio y modelo asociado de un secador rotatorio. Difieren en la forma en la que se describen, la cinética de secado, el tiempo de retención y la transferencia de calor [4,11]. Sin embargo, hay pocos documentos que tratan con el modelado dinámico de un secador rotatorio. Entre estos últimos podemos mencionar la referencia [10], donde se obtienen cuatro ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas.

El modelo dinámico desarrollado en [11], representa la dinámica de un secador rotatorio directo, dicho modelo es utilizado en el presente trabajo para efectos de simulación e implementación del sistema de control avanzado que motiva este artículo. Además, la simplificación de diseño incluye las consideraciones siguientes:

- Secador adiabático.
- Gradientes radiales despreciables.
- Constante de tiempo de residencia medio de sólidos a lo largo del tambor.
- Efectos insignificantes de radiación, difusión y conducción.
- Espacio de gases constante.

- Propiedades físicas constantes.
- Pérdidas de presión despreciables.

El modelo se obtiene aplicando los balances dinámicos de masa y energía para las dos fases en un volumen de control discreto, como se muestra en la Figura 2. Los balances serán:

Contenido de humedad en el sólido,  $X$  (base seca):

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_k = \left(\frac{L_{k-1}}{L_k}\right) \cdot \left(\frac{v_s}{\delta_z}\right)_k \cdot (X_{k-1} - X_k) - N_k$$

Humedad del gas,  $Y$  (base seca):

$$\left(\frac{dY}{dt}\right)_k = \left(\frac{v_{gh}}{\delta_z}\right)_k \cdot (Y_{k-1} - Y_k) + \left(\frac{NLv_s}{Gv_s}\right)_k$$

Temperatura del sólido,  $T_s$ :

$$\left(C_h \cdot \frac{dT_s}{dt}\right)_k = \left(\frac{U_a A v_s}{L} \cdot (T_g - T_s)\right)_k + \left(\frac{L_{k-1}}{L_k}\right) \cdot \left(\frac{v_s}{\delta_k}\right) \cdot (h_{k-1} - h_k) - (NH_{v_s})_k - \left(C_a T_s \frac{dX}{dt}\right)_k$$

Temperatura del gas,  $T_g$ :

$$\left(C_h \cdot \frac{dT_g}{dt}\right)_k = -\left(\frac{U_a A v_s}{G} \cdot (T_g - T_s)\right)_k + \left(\frac{v_g}{\delta_z}\right)_k \cdot (H_{k-1} - H_k) + \left(\frac{H_{v_s} NLv_g}{Gv_s}\right)_k - \left(U_v \frac{dY}{dt}\right)_k$$

Notar que para la fase gaseosa un balance dinámico de la energía interna debe ser utilizado, para más detalles ver las referencias [11-14].

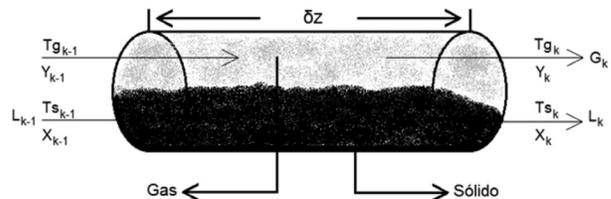


Figura 2. Control de volumen para el balance de masa y energía

La calibración experimental de este modelo se ha realizado para diferentes puntos de operación en mediciones efectuadas a lo largo del tambor de un

Secador rotatorio piloto de 3 metros de largo. Un ejemplo de ello es mostrado en la Figura 3, presentando diferentes perfiles de trabajo para el secador rotatorio.

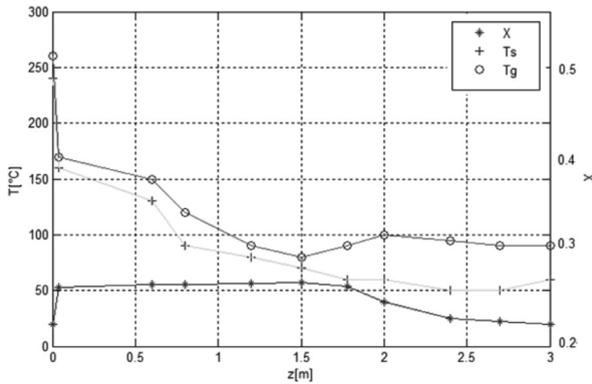


Figura 3. Perfiles experimentales de las variables de estado que se indican en el secador rotatorio

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Simulación del modelo del secador rotatorio

Para poder llegar a nuestro objetivo, es necesario simular el modelo del secador rotatorio descrito en la sección 2.3, definido como un secador con  $k$  etapas de secado, y luego programar las diferentes estructuras del bloque de auto-sintonía. La respuesta del sistema simulado se puede observar en las Figuras 4, 5 y 6 para  $k=3$  etapas del secador rotatorio. La cinética de secado fue calculada usando un modelo de difusividad variable con un término.

#### 3.2 Simulación del lazo de control con sintonía clásica

El modelo del secador rotatorio, anteriormente mencionado, es controlado y simulado vía Simulink. Un bloque tipo S-function permite implementar un sistema de control utilizando las ecuaciones diferenciales no-lineales que definen la dinámica del sistema (Figura 7).

Se debe notar que la variable controlada (Humedad del

producto) como la manipulada (Temperatura de gases de entrada) han sido trabajadas en forma adimensional, con el fin de que el algoritmo de control opere bajo el concepto de semejanza estadística.

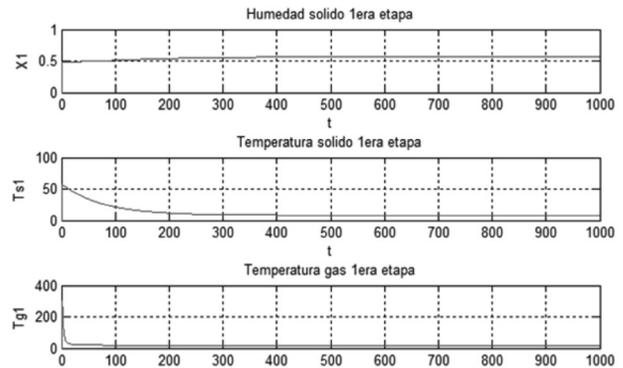


Figura 4. Secador rotatorio, primera etapa

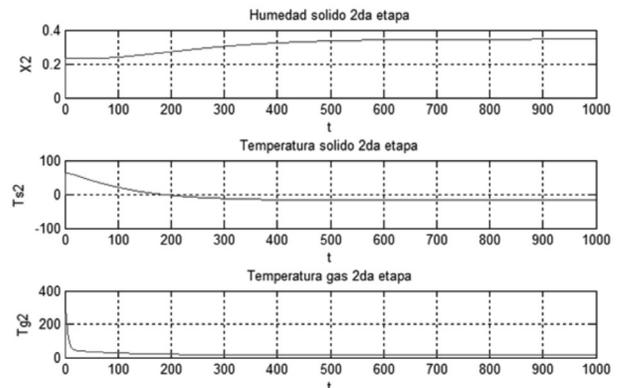


Figura 5. Secador rotatorio, segunda etapa

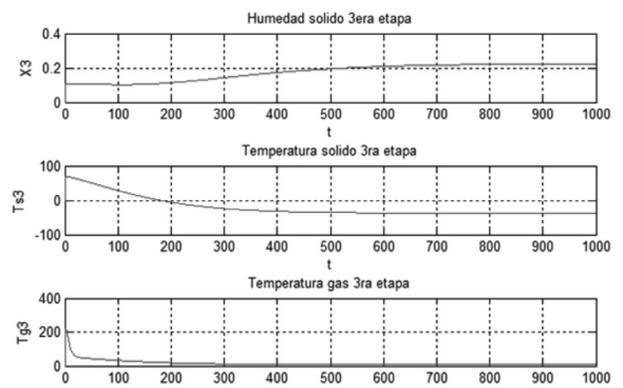


Figura 6. Secador rotatorio, tercera etapa

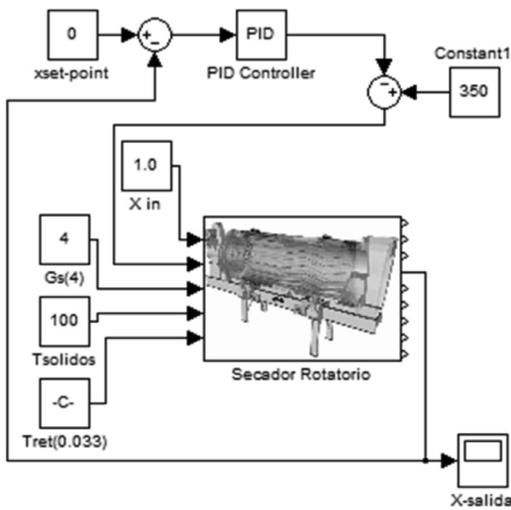


Figura 7. Sistema de control convencional para un secador rotatorio de corrientes directas

Para realizar este lazo de control se utiliza un controlador PID convencional, el cual, utiliza sintonización sugerida en la referencia [11]. La Figura 8 muestra la salida controlada del secador rotatorio utilizando el modelo descrito en la sección 2.3, el cual considera un controlador PID sintonizado clásicamente por  $K_c=100$ ,  $T_i=1$  y  $T_d=1$ , con respuesta a un escalón unitario de magnitud -0.2 (humedad del sólido). En este caso, la acción de control es calculada a través de un PID que idealmente se describe como en (3):

$$u(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Los procesos industriales comunes no son lineales y exhiben dinámicas variantes en el tiempo. Como resultado de ello, los controladores PID no siempre trabajan adecuadamente y requieren que sus sintonías sean ajustadas [6,15-17]. Este hecho fundamenta la propuesta PI/PID auto-sintonizado cuyos resultados se muestran a continuación.

### 3.3 Control PI/PID auto-sintonizado basado en optimización no lineal

Al aplicar el algoritmo de optimización para obtener auto-sintonía del controlador PID, es decir, variación instantánea de los valores de las constantes de sintonía,  $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  dentro de un rango durante el proceso de simulación. La Figura 9, muestra la resultante para la tercera etapa del reactor con valores óptimos de sintonía

para el controlador PID para un horizonte de predicción de  $\ell = 15$  minutos.

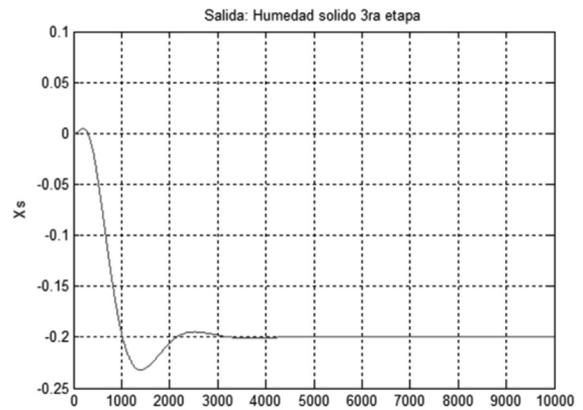


Figura 8. Lazo de control clásico aplicado al secador rotatorio, respuesta de la tercera etapa (horizonte  $\ell = 15$  minutos).

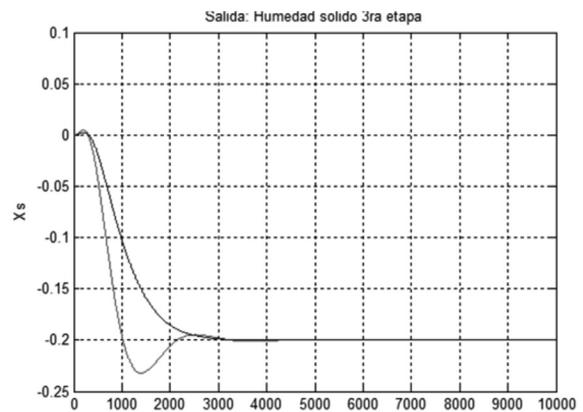


Figura 9. Lazo de control PID clásico (rojo) y sintonía óptima propuesta (azul).

En general, la velocidad de respuesta en lazo cerrado y la calidad de ésta, dependerán de las capacidades del algoritmo de optimización empleado. En particular, la sub-óptimalidad de la sintonía está directamente ligada a la capacidad del algoritmo de optimización para evitar o salir de óptimos locales.

Por otro lado, es interesante destacar que el controlador opera como un controlador predictivo, en un horizonte preescrito de tiempo [6, 17]. De modo tal que la respuesta en lazo cerrado no podrá nunca poseer ni sobre-oscilaciones, ni sobre-pasos desde la referencia fijada para su operación. Esto es válido, para procesos que aún siendo no lineales, puedan ser adecuadamente

aproximadas como plantas de primer o segundo orden más retardo de tiempo.

### 3. CONCLUSIONES

Aun cuando la composición variable de la materia prima y la falta de instrumentos adecuados para medir en línea son factores que complican el control eficiente de un secador rotatorio, los resultados expresados por la Figura 8, muestran la supremacía de la propuesta respecto de la sintonía clásica que se ha utilizado para este proceso. En efecto, los valores de auto-sintonía obtenidos a través del algoritmo de optimización y su respuesta asociada a la tercera etapa del secador rotatorio (Figura 8) muestran similar estabilización, pero si un mejor tiempo de respuesta y sin oscilaciones típicas del sobre-amortiguamiento en torno a la referencia alcanzada.

El proceso y su dinámica reproducen adecuadamente el comportamiento del secador rotatorio piloto. En particular, las dificultades para realizar el control son los largos tiempos de retardo y los tiempos de respuesta en la fase sólida. El proceso es extremadamente no lineal pues el valor de los parámetros es altamente dependiente del punto de operación del secador rotatorio, aun así la propuesta aplicada a un secador rotatorio piloto se revela alentadora, y con factibilidad de ser escalada industrialmente.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad Andres Bello a través del proyecto UNAB DI-05-10/R y el fondo de investigación FONDECYT proyecto 1090062.

### REFERENCIAS

- [1] Rynieccki, A. and Nellist, M.E., Optimization of Control Systems for Near-Ambient Grain Drying: Part 2, The Optimizing Simulations. *J. Agr. Eng. Res.*, 48, pp. 19-35, 1991.
- [2] Corrêa, N.A., Corrêa, R.G. and Freire, J.T., Self-tuning Control of Egg Drying in Spouted Bed using the GPC Algorithm. *Dry. Technol.*, 20(4&5), pp. 813-828, 2002.
- [3] Abdel-Jabbar, N.M., Jumah, R.Y. and Al-Haj Ali, M.Q., State Estimation and State Feedback Control for Continuous Fluidized Bed Dryers. *J. Food Eng.*, 70(2), pp. 197-203, 2005.
- [4] Dufour, P., Touré, Y., Blanc, D. and Laurent, P., On Nonlinear Distributed Parameter Model Predictive Control Strategy: On-line Calculation Time Reduction and Application to an Experimental Drying Process. *Computers and Chemical Engineering*, 27(11), pp. 1533-1542, 2003.
- [5] Corrêa, N.A., Freire, F.B., Corrêa, R.G. and Freire, J.T., Industrial Trials of Paste Drying in Spouted Beds Under QDMC. *Dry. Technol.*, 22(5), pp. 1087-1105, 2004.
- [6] Aström, K.J., Hagglund, T., Hang, C.C. and Ho, W.K., Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers – Survey. *Control Eng. Pract.*, 1(4), pp. 699-714, 1993.
- [7] Boillereaux, L., Estimation d'état des procédés non-linéaires: Méthode a horizon glissant avec indicateur de qualité. PhD tesis, Laboratory of Automatic Control of Grenoble (LAG). Francia. 1996.
- [8] Salcedo, R. and Correa, R., Sicomp: Simulador para control predictivo basado en modelos, *Dyna. rev. fac. nac. minas*, 75(156), pp. 89-98, 2008.
- [9] Thibault, J., Duchesne, C., Evaluation of Simple Control Strategies for Rotary Dryers. *Dry. Technol.*, 22(5), pp. 947-962, 2004.
- [10] Balchen, J., Mumeé, K., Process Control Structures and Applications, Appendix L. VNR Co., New York, 1988.
- [11] Pérez-Correa, J.R., Cubillos, F., Zavala, E., Shene, C., Álvarez, P.I., Dynamic Simulation and Control of Direct Rotary Dryers. *Food Control*, 9(4), 195-203, 1998.
- [12] Luz, G. R., Dos Santos Conceição, W.A., Matos Jorge, L.M., Paraíso, P.R., Goncalves Andrade C.M. Dynamic modeling and control of soybean meal drying in a direct rotary dryer. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2-3), pp. 90-98, 2010.
- [13] Xu, Q. and Peng, S., Mathematical modeling of rotary drying of woody biomass, *Drying Technology*, 26, pp. 1344-1350, 2008.
- [14] Arinze, E.A., Schoenau, G.J., and Adapa, P., Modeling the fractional drying and aerodynamic separation of alfalfa into leaves and stem in a rotary dryer, *Drying Technology*, 25, pp. 785-798, 2007.
- [15] Kirk, D., Optimal Control Theory: an Introduction, Prentice-Hall, 1970.
- [16] Morari, M., Zafriou, E., Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [17] Dufour, P., Control engineering in drying technology: review and trends. *Drying Technology*, 24(7) 889-904, 2006.