

# Estimación de los Parámetros de un Modelo de una Celda Fotovoltaica Utilizando un Algoritmo de Optimización de Búsqueda de Patrones

Para citar este artículo /  
To reference this article /  
Para citar este artigo.  
Tobón, M. Andrés F., &  
Herrera, C. Jorge A.,  
& Restrepo, Julian P  
(2014). Estimación de los  
Parámetros de un Modelo  
de una Celda Fotovoltaica  
Utilizando un Algoritmo de  
Optimización de Búsqueda  
de Patrones. Ingenio Magno.  
Vol 5, pp. 95 - 101

## ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF A PHOTOVOLTAIC CELL MODEL USING A PATTERN SEARCH METHOD ALGORITHM

Tobón Mejía Andrés Felipe  
Instituto Tecnológico Metropolitano  
Medellín, Colombia  
e\_mail: andrestobon@itm.edu.co.

Herrera Cuartas Jorge Aurelio  
Instituto Tecnológico Metropolitano  
Medellín, Colombia  
e\_mail: jorgeherrera@itm.edu.co.

Peláez Restrepo Julián  
Instituto Tecnológico Metropolitano  
Medellín, Colombia  
e\_mail: julianpelaez@itm.edu.co.

Recepción: 2014 - 07 - 02 \ Aceptación: 2014 - 12 - 27

### RESUMEN

En este artículo se propone un nuevo método para la estimación de los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica de un solo diodo. El trabajo está basado en el algoritmo de optimización llamado Pattern Search Method (MPS, por sus siglas en inglés). Los parámetros estimados son: corriente de diodo, corriente de saturación, resistencia en serie, resistencia en paralelo y el factor del diodo ideal. Los resultados muestran que es posible obtener el modelo equivalente a través de la identificación de los parámetros. Adicionalmente, los resultados obtenidos son comparados con datos obtenidos mediante un emulador de celdas fotovoltaicas. Para realizar los experimentos se asumió condiciones controladas, es decir, temperatura e irradiación constantes. De esta manera, se puede deducir que el método propuesto se puede utilizar en aplicaciones de control para el seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) de celdas fotovoltaicas.

**Palabras Clave:** Electrónica de potencia, fotovoltaicos, Pattern Search Method, Sistemas MPP.

### ABSTRACT

In this paper a new method for estimating parameters of the mathematical model of a photovoltaic cell of a single diode, is proposed. The work is based on the optimization algorithm called Pattern Search Method (MPS). The estimated parameters are: current diode, saturation current, series resistance, shunt resistance and the factor of the ideal diode. The results show that it is possible to obtain the equivalent model through the parameter identification. Additionally, the results obtained are compared with data obtained by an emulator of photovoltaic cells. The experiments are performed under controlled conditions, i.e., temperature and irradiation are assumed constant. In this way, it can be deduced that the proposed approach can be used in control applications for the maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic cells.

**Key words:** MPP, Pattern Search Method, Power electronic, System photovoltaic

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el mundo existe una creciente demanda energética que se supe, en su mayoría, con combustibles fósiles propiciando el cambio climático. En este sentido, se han realizado investigaciones orientadas a remplazar estas fuentes de energía por otras alternativas, más amigables con el medio ambiente, diversificando la generación de energía y disminuyendo la dependencia de nuestra sociedad a los recursos no renovables.

Una fuente de energía alternativa propicia para las regiones tropicales, es la energía obtenida por celdas fotovoltaicas. A pesar de los avances tecnológicos en este medio de captación de energía, el desarrollo de estos sistemas se ha visto limitado por diversos factores como: el alto costo de adquisición [1][2][3], la baja eficiencia de conversión y la dependencia de condiciones ambientales como temperatura ambiente e intensidad de irradiación, que determinan la potencia de salida extraída de las células solares [2][3]. Por esto, es necesario desarrollar tecnologías de producción energéticas eficientes, asequibles y que permitan maximizar la extracción de energía en las diferentes condiciones ambientales, supliendo la creciente demanda energética de energía limpia.

Para mejorar la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos se han desarrollado investigaciones orientadas hacia la optimización del seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés), en dichas investigaciones usualmente se realiza un control basado en modelo y para ello implementan algunos algoritmos de optimización para la extracción de los parámetros del modelo de la celda, tales como: enjambres de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) [4], evolución diferencial (DE, por sus siglas en inglés) [5] y algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) [6]. A diferencia de los trabajos mencionados, que se enfocan solo en descripción de resultados, este además, hace una descripción del funcionamiento del algoritmo MPS y la evolución de los parámetros estimados, haciendo posible reproducir el experimento. El MPS es un algoritmo de optimización que no utiliza derivadas y que se puede implementar en línea.

## 2. MARCO TEÓRICO

### MODELO DE PANEL FOTOVOLTAICO DE UN DIODO

Una celda fotovoltaica se puede modelar como un diodo semiconductor cuya unión p-n se expone a la luz. Las celdas fotovoltaicas están hechas de varios tipos de semiconductores como: celdas de silicio mono y poli cristalinas, siendo estas últimas más económicas. Las celdas de silicio fotovoltaicas se componen de una fina capa de silicio que se conecta a las terminales eléctricas [7].

En la ecuación 1 se presenta el modelo matemático de una celda fotovoltaica de un diodo propuesto por [5]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I * R_s}{n * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (1)$$

Donde  $I$  es la corriente de salida,  $V$  es el voltaje de salida,  $I_{ph}$  es la corriente generada por la celda fotovoltaica,  $R_s$  y  $R_p$  son las resistencias en serie y en paralelo respectivamente,  $V_t$  es la tensión térmica del diodo ( $V_t = k * T/q$ ,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $k = 1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $q$  es la carga del electrodo,  $T$  es la temperatura de la celda fotovoltaica en grados Kelvin, y  $n$  es el factor del diodo ideal.

El circuito de la Figura 1 se puede utilizar como circuito de un diodo equivalente a una celda fotovoltaica, sin embargo, es solo un modelo simplificado y no representa todas las dinámicas presentes en la celda.

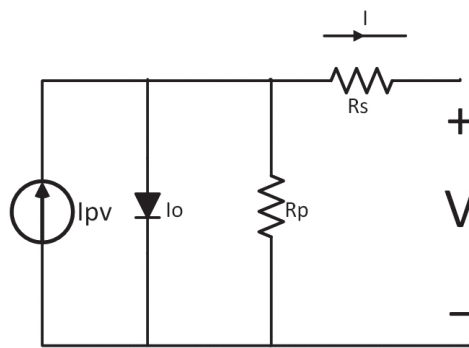


FIGURA 1. Circuito equivalente del modelo de una celda fotovoltaica.

## PATTERN SEARCH METHOD

El MPS está conformado por dos partes fundamentales, una secuencia de mallas y una lista de las condiciones de encuesta. Una malla es una matriz donde la búsqueda de una iteración está restringida. A lo largo de la optimización las condiciones que generan las encuestas dan las directrices para el acotado de la malla actual, asegurando de esta manera la convergencia del algoritmo. Una descripción más formal del MPS se presenta a continuación.

Sea  $M_0$  de una malla con  $\beta \equiv \{x | a \leq x \leq b\}$  donde  $x_0 \in M_0$ . Sea  $x_0 \subset M_0$  contiene  $x_0$  y  $2n$  puntos adyacentes a  $x_0$  donde la diferencia entre esos puntos y  $x_0$  forman una base positiva máxima para  $R^n$ .

A medida que el algoritmo genera  $x_k \in M_k$ , sea  $X_k \subset M_k$  se define de la misma forma para  $k = 0, 1, \dots$

En términos más simples, según el rango del vector de cada variable, se generan n cantidad de variables equidistantes entre el mismo rango, formando la malla. A cada una de ellas se les realiza una encuesta hasta determinar el mínimo parcial, una vez encontrado, se conserva haciendo la malla más pequeña y encuestando nuevamente, si se encuentra un nuevo mínimo, se cambia por el antes encontrado conservando un mínimo global.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra el hardware empleado para realizar las emulaciones del panel solar, que consta de: emulador de celdas fotovoltaicas 62000H series Chroma, generador de cargas BK Precision 8502 de 300 W, computador Core I5 con 4 Gigas de memoria RAM y un sistema operativo Windows 7.

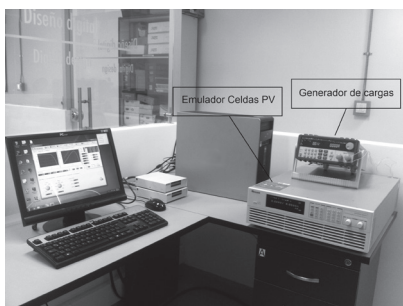
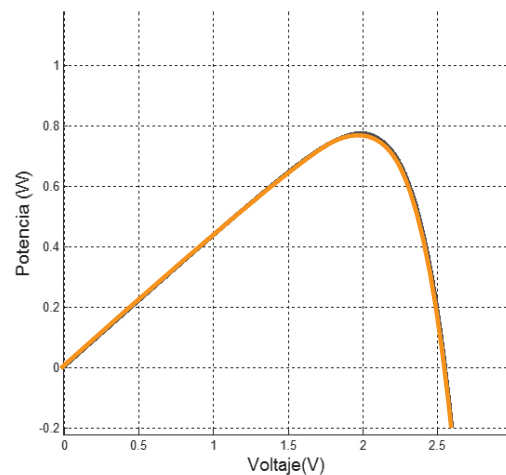


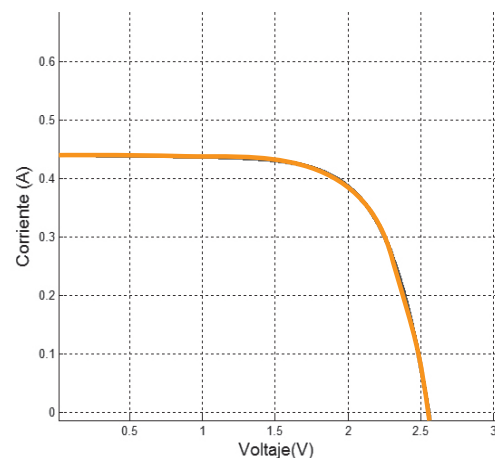
FIGURA 2. montaje experimental del sistema de emulación de una celda fotovoltaica.

El emulador de celdas fotovoltaicas permite hacer pruebas controladas bajo condiciones de laboratorio, emulando la iluminación aproximada de la luz solar natural, es capaz de hacer los ajustes del hardware desde el software, también puede controlar la medición de la salida, mostrar en pantalla vistas previas y permite exportar los resultados en hojas de cálculo para su respectivo estudio.

En la Figura 3, se presenta una respuesta típica del emulador. En este caso se configura la temperatura de la celda  $T = 31^{\circ}C$  y la radiación solar  $G = 601.50 W/m^2$



a.



b.

FIGURA 3: respuesta típica de un emulador de celdas fotovoltaicas. Voltaje vs Potencia (a) y Voltaje vs Corriente (b)

Los algoritmos utilizados en el método propuesto para estimar los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica de un diodo, fueron los siguientes:

#### ALGORITMO 1: PATTERN SEARCH METHOD

```

1: For k=0,1,2,... do
2:   Buscar: emplea una estrategia finita para elegir  $x_{k+1} \in M_k$  de tal forma que  $f(x_{k+1}) < f(x_k)$ 
3:   if dado  $x_{k+1}$  se encuentra then
4:     declare la búsqueda exitosa
5:      $M_{k+1} = M_k$ 
6:     Incremente k;
7:   else
8:     Encuesta
9:     if  $x_k$  Minimizar  $f(x)$  para  $x \in X_k$  Then
10:      Declare la encuesta no exitosa,
11:       $x_{k+1} = x_k$ ,
12:       $M_{k+1} = M_k/2$ ;
13:    else
14:      declare la encuesta exitosa,
15:      Establecer  $x_{k+1}$  Para un punto en  $x_k$  en el que  $f(x_{k+1}) < f(x_k)$ 
16:      declare  $M_{k+1} = M_k$ 
17:      Incrementa k.
18:    end if
19:  end if
20: end for

```

En la línea del paso 8 se debe auto guardar, garantizando la convergencia en los resultados, tal como lo presenta [8].

#### ALGORITMO 2: MÉTODO PROPUESTO BASADO EN PATTERN SEARCH METHOD

```

1:  $I_{pv} \in (0.5)$ ,  $I_s \in (1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-5})$ ,  $R_s \in (0.2)$ ,  $R_p \in (50, 5000)$ ,  $n \in (0.5, 10)$ 
2: Mod=tmod   Tamaño del modelo
3: It=nit     Número de iteraciones
4: For Tr=1:It
5:   For k=1:Mod Variación para  $R_p$ 
6:     For m=1:Mod Variación para  $R_s$ 
7:       For s=1:Mod Variación para n
8:         For t=1:Mod Variación para  $I_o$ 
9:           For r=1:Mod Variación para  $I_{pv}$ 
10:            Evaluar eq 1.
11:            [ $R_p, R_s, n, I_o, I_{pv}$ ] →Guarda los mínimos
12:          end for
13:        end for
14:      end for
15:    end for
16:  end for
17: end for

```

## 4. RESULTADOS

### ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PROPUESTOS BASADOS EN MPS

Obtenidas las pruebas experimentales en el emulador, se toma el Voltaje (V) y la Corriente (A) de la curva de la Figura 3 (b), estos datos se introducen en el algoritmo 2, arrojando como resultado los siguientes cinco parámetros:  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  y  $I_{pv}$  del modelo de la celda y se sustituyen en la ec. 1, obteniendo así la ec. 2.

$$R_p = 636.4520 \Omega, R_s = 0.3366 \Omega, \\ n = 9.0203, I_0 = 7.03 \times 10^{-6} A \text{ y } I_{pv} = 0.4423$$

$$I = 0.4423 - 7.03 \times 10^{-6} \left[ \exp \left( \frac{V + I * 0.3366}{9.0203 * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I * 0.3366}{636.4520} \quad (2)$$

La ecuación 2 se simula mediante el algoritmo propuesto por [7], que detalla el algoritmo y la ecuación con uno o dos diodos.

### EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS

En la Figura 4 se muestra la evolución de los parámetros:  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  y  $I_{pv}$  iteración a iteración, hasta llegar a su estado estable, alrededor de las 30 iteraciones.

Haciendo uso del algoritmo 2 se hacen iteraciones en paralelo de cada variable y a su vez se identifica el error de la ecuación. 1. Se compara el resultado parcial, con el resultado del emulador hasta llegar a un error casi cero, acotando los parámetros iteración a iteración.

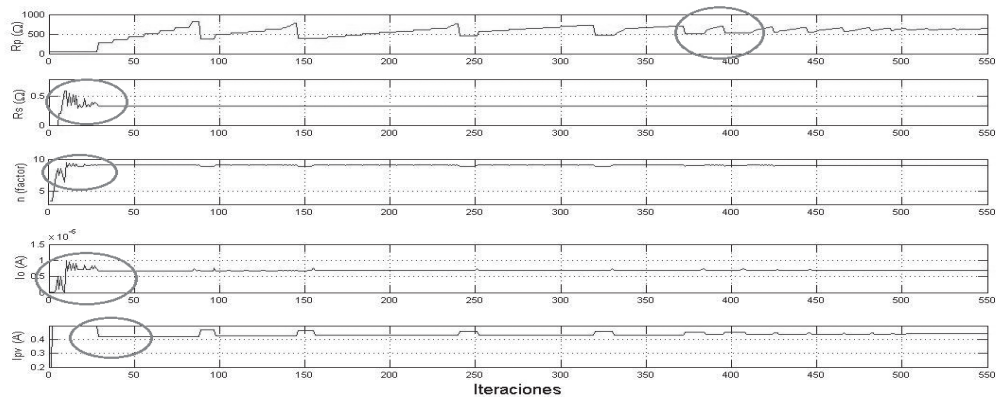


FIGURA 4. evolución de parámetros  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  y  $I_{pv}$

En la Figs. 5, 6, 7 y 8 se pueden ver detalladamente como los parámetros, iteración a iteración, llega a su estado estable en donde cada uno de sus puntos es un mínimo local y progresivamente se va convirtiendo en un mínimo global.

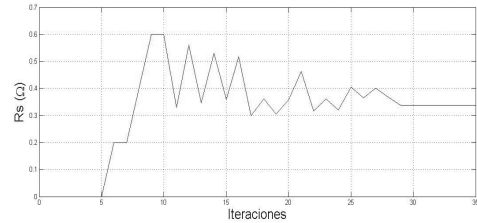


FIGURA 5. zoom del parámetro  $R_s$

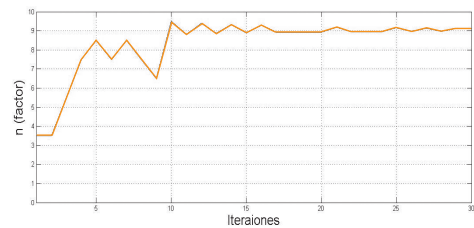


FIGURA 6. zoom del parámetro  $n$

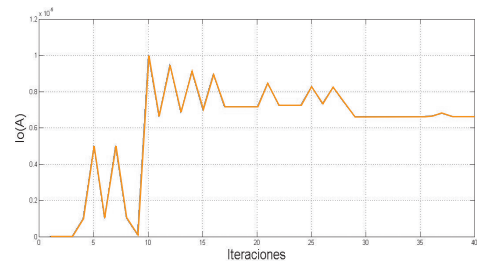


FIGURA 7. zoom del parámetro  $I_0$

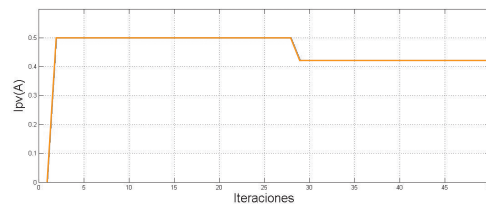


FIGURA 8. zoom del parámetro

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Las Figs. 9 y 10, muestran la similitud alcanzada entre los datos del modelo obtenido mediante el algoritmo propuesto y los datos del modelo del emulador de celdas fotovoltaicas. Las áreas de mayor importancia para el estudio del MPPT se muestran encerradas en círculos rojos, dado que allí se alcanzan los puntos de mayor extracción de potencia de la celda. Al restar los valores en el área señalada de la Figura 9, se halló un error absoluto de 0.0082, lo que demuestra la precisión del modelo propuesto.

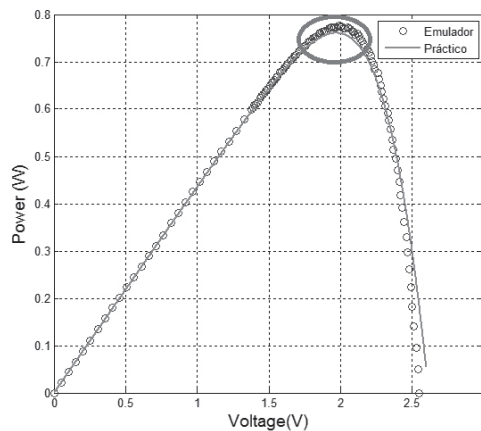


FIGURA 9. comparación Potencia vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo MPS

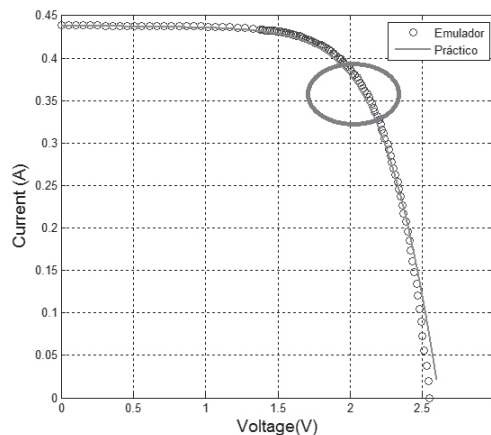


FIGURA 10. comparación Corriente vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo MPS

En la Figura 11, se ve la evolución del error absoluto obtenido de la comparación de los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo MPS, cuando se han encontrado nuevos mínimos globales, llegando a un error menor de 0.02 .

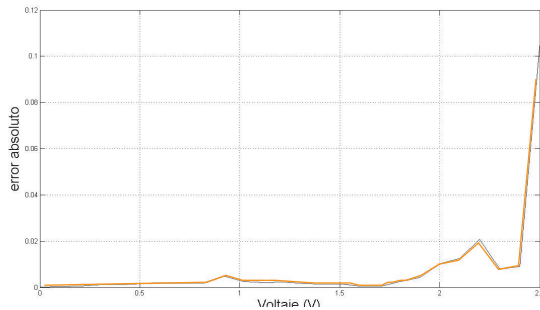


FIGURA 11. error absoluto obtenido de la comparación de los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo MPS

## 5. CONCLUSIONES

El método propuesto MPS para la estimación del modelo de una celda fotovoltaica, demostró su precisión para ser utilizado en estudios del MPPT, dado que el modelo propuesto se aproximó al modelo real tomado del emulador de celdas fotovoltaicas, con un error absoluto general menor de 0.02 y un error de 0.0082, en el área de máxima potencia, lo que se traduce, en un modelo óptimo para realizar control para la extracción de máxima energía de una celda fotovoltaica.

Se requieren de nuevos estudios donde se hagan búsquedas más exhaustivas hasta llegar a un error general igual o menor al error general encontrado de 0.02; para eliminar las discrepancias entre el modelo propuesto y el modelo del emulador, en áreas diferentes al MPP.

1. P. Bhatnagar and R. K. Nema, "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 224–241, Jul. 2013.
2. M. Farivar, G M. "An Improved FLC Algorithm for Tracking Maximum Power Point in Photovoltaic Systems," *IEEE*, pp. 342–347, 2012.
3. M. H. Moradi and A. R. Reisi, "A hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2965–2976, Nov. 2011.
4. K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, "An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, pp. 3627–3638, Aug. 2012.
5. L. L. Jiang, D. L. Maskell, and J. C. Patra, "Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 185–193, Dec. 2013.
6. M. Zagrouba, A. Sellami, M. Bouaïcha, and M. Ksouri, "Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 860–866, May 2010.
7. M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
8. W. D. Zhang and Y. X. Sun, "Modified Smith Predictor for Controlling Integrator/Time Delay Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, no. 8, pp. 2769–2772, Jan. 1996.