

Modelamiento y control de una ventana de material cromogénico

Modeling and control of chromogenic window

Jairo Alberto Andrade H.*¹ y Fabio Emiro Sierra Vargas*²

¹MSc en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia. *jaandradelb@unal.edu.co

²PhD. Profesor asociado Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Colombia. *fesierrav@unal.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 24/09/2012 Fecha de aceptación del artículo: 28/12/2012

Resumen

Los materiales cromogénicos permiten ser alterados en sus propiedades ópticas y térmicas a través de una acción eléctrica, su aplicación en sistemas de control de luz día en construcciones de edificios y viviendas puede generar un aprovechamiento de las condiciones ambientales naturales y por tanto de la energía eléctrica empleada en iluminación artificial y en sistemas HVAC. Se diseñó y construyó una ventana prototipo de pruebas para la realización del sistema de control realimentado. Se realizó un driver electrónico, actuador de la planta construida para regular la transmitancia del vidrio y un sensor de par emisor-receptor de luz visible, basado en diodo led de luz blanca y fotoreceptor de luz ambiente con filtro IR para medir la transmitancia del vidrio e informar a un controlador basado en PC, quien define las señales de entrada para la ventana cromogénica.

Palabras Clave

Dispositivos de partículas suspendidas, identificación de sistemas, materiales cromogénicos, sistemas de control de luz día.

Abstract

Chromogenic materials alter their optical and thermal properties due to an electric impulse; their application on lighting control systems for build-

ings and households harnesses the environmental conditions and reduces electrical consumption regarding artificial lightning and heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. During this work a prototype window was built and a feedback control system was installed. An electronic driver was employed; the window transmittance was measured by a visible light transmissor-receptor sensor based on a white light led diode and an IR-filtered ambient photoreceptor. This system informs a computer control which defines the input signal sent to the actuator; this regulates the transmittance of the chromogenic window.

Keywords

Particles hanging dispositives, system identifications, chromogenic materials, lighting control systems.

I. Introducción

Este trabajo apunta hacia los sistemas de control de luz día como un mecanismo de aprovechamiento de energía natural, que con una óptima integración tecnológica con los sistemas HVAC (“Heating, Ventilation and Air Conditioning”) y sistemas de iluminación eléctrica, son un recurso potencial de ahorro energético en las construcciones modernas. El punto a tratar son las ventanas; ellas son un elemento fundamental de las fachadas y, a su vez, definen una gran parte de la carga tér-

mica y lumínica del edificio y, por tanto, de su demanda eléctrica [1]. Si las ventanas u otros dispositivos de sombra dejan de ser elementos pasivos y se convierten en elementos activos, de tal manera que se adapten a las condiciones ambientales térmicas y de intensidad lumínica externas, terminarán ofreciendo un control dinámico y adaptivo de las propiedades térmicas y ópticas de la fachada. “Esta funcionalidad puede emplearse para maximizar el confort y desempeño de los ocupantes mientras minimiza el uso de energía anual y la demanda en el pico eléctrico” [2].

Varios estudios han mostrado la potencialidad del ahorro energético con el uso de materiales cromogénicos dentro de la composición de fachadas, tales como [2]-[7] allí se mencionan, ahorros en el consumo anual de electricidad total entre el 27-55% con un diseño eficiente. Sin embargo, los trabajos encontrados no atestiguan un suficiente enfoque hacia el modelamiento y control automático de este tipo de dispositivos y, además, existen pocos trabajos con pruebas reales y estudios de campo [8]; esto debido en gran parte a que, por el momento, son tecnologías comercialmente emergentes. Los controladores automáticos para este tipo de tecnología son escasos, difícilmente comerciales, costosos y poco flexibles para ser integrados dentro de un sistema más general. Por tal razón, este estudio contribuye a conocer el problema de una ventana de tecnología *SPD* (Suspended Particle Devices) desde el punto de vista de control y, de ésta manera, preparar las condiciones para incluir ventanas cromogénicas dentro de sistemas de optimización energética en edificios. El prototipo construido será empleado en futuras pruebas que incluyan los estudios de impacto térmico que estos dispositivos pueden llegar a generar; por el momento, se trató el problema de luz visible.

II. Materiales y métodos

A. Materiales cromogénicos

Los materiales cromogénicos son materiales compuestos desarrollados por el hombre (algunos usan

propiedades naturales), cuya “propiedad básica consiste en lograr un considerable cambio en sus propiedades ópticas y a su vez en la intensidad y/o composición espectral de la luz que cruza a través de él” [9]; de esta manera, también reduce las ganancias de calor solar que atraviesan a través del material cuando es aplicada una determinada señal de excitación. Estos materiales que hacen parte de los llamados “materiales inteligentes”, al ser incluidos en ciertos dispositivos de acristalamiento, tienen una gran área de aplicación, por ejemplo en edificios, automóviles, aviones y ciertos tipos de displays electrónicos [10].

Los diferentes materiales cromogénicos existentes suelen tener principios de funcionamiento distintos. En este sentido, algunos funcionan de acuerdo a un movimiento de masa directo y otros de acuerdo a un movimiento físico colectivo [11]. El primero se refiere a un movimiento localizado de iones y electrones en los que podrían clasificarse los materiales fotorefractivos, fotocromáticos, “electrochromics” –EC- y termocrómicos. El segundo corresponde a un movimiento físico de orientación de sus componentes y estarían allí encasilladas las tecnologías de cristal líquido, dispositivos de partículas suspendidas SPD, rejillas de difracción ajustables y membranas deformables. Los dispositivos cromogénicos también pueden clasificarse por su forma de estimulación: eléctrica, lumínica, térmica, etc. Los primeros son de mayor interés en la arquitectura de edificios al poderse controlar con un dispositivo electrónico. Entre éstos se encuentran comprendidos los “electrochromics EC”, los dispositivos de partículas suspendidas SPD y los cristales líquidos dispersos. Sin embargo, estos últimos solamente ofrecen una conmutación ON-OFF mientras que los EC y SPD se pueden regular continuamente dentro de un rango de transmitancia. Las tecnologías SPD y EC son tecnologías muy similares aparentemente, pese a que tienen principios de funcionamiento muy distintos. Lo más interesante de la tecnología SPD es su rápida respuesta frente a EC. Mientras el tiempo de asentamiento de un dispositivo SPD es generalmente de unos pocos segundos, el de un dispositivo EC es de varios minutos.

B. Dispositivos de partículas suspendidas SPD

Un dispositivo SPD típicamente se compone de 7 capas: 2 paneles de vidrio o plástico, 2 capas de material conductor transparente (los electrodos forman un capacitor del tamaño del vidrio que encierra la capa activa), 2 capas de material dieléctrico transparente que aísla el electrodo de la película activa, 1 película activa (allí se encuentran las micro-partículas suspendidas en un fluido orgánico o gel no conductor que actúa como el dieléctrico del capacitor). Las partículas son “electrophoretic particles” en formas alargadas, pigmentadas de un color oscuro. Estas partículas pueden girar y ordenarse en presencia de un campo eléctrico, debido a un proceso llamado “electrophoresis”. El fenómeno de “electrophoresis” consiste precisamente en el movimiento de partículas cargadas eléctricamente bajo la influencia de un campo eléctrico. Este movimiento es debido a la fuerza de coulomb $\vec{F} = q\vec{E}$, la cual puede relacionarse con las propiedades eléctricas del cuerpo y las condiciones eléctricas del ambiente.

Sin presencia de campo eléctrico, la orientación de las partículas de forma alargada será aleatoria dentro del líquido y, debido a su pigmentación oscura, en conjunto no permitirán el paso de luz visible. En presencia de un campo eléctrico, las partículas se orientan uniformemente y su sentido de orientación depende de la intensidad del campo. Las partículas pueden llegar a orientarse horizontalmente de tal manera que permiten el paso de luz visible, tal como un efecto de persiana.

Lo anterior es ilustrado gráficamente en la Figura 1.

C. Prototipo de pruebas

Para el diseño del módulo físico se han tenido en cuenta tanto las variables de interés directo que interactúan dentro del sistema de control, como otras variables y, de forma experimental, observar su influencia o no sobre la planta. Tales variables son la radiación solar que llega de forma perpendicular a la cara externa de la ventana y la temperatura ex-

terna e interna. Una ilustración del prototipo construido es mostrada en la Figura 2. Su carácter es portátil, debido a que el dispositivo sería sometido a diferentes pruebas y lugares; por ejemplo, para observar el comportamiento del material bajo la influencia de cambios en la temperatura externa.

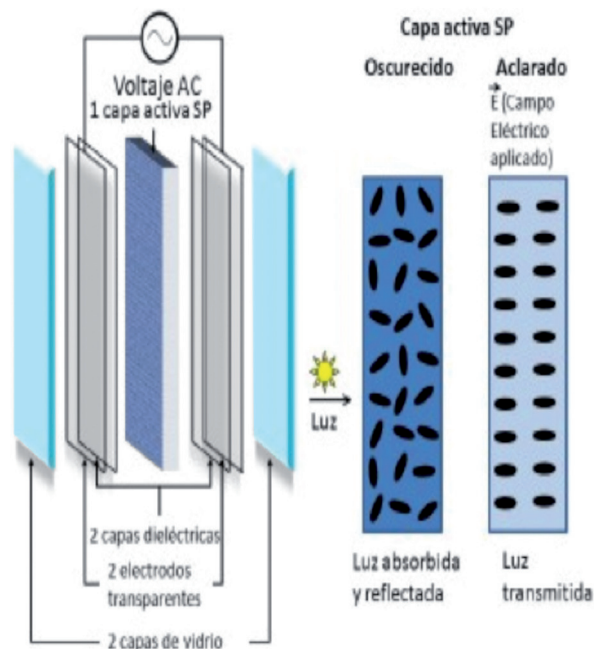


Figura 1. Composición de un dispositivo de partículas suspendidas.

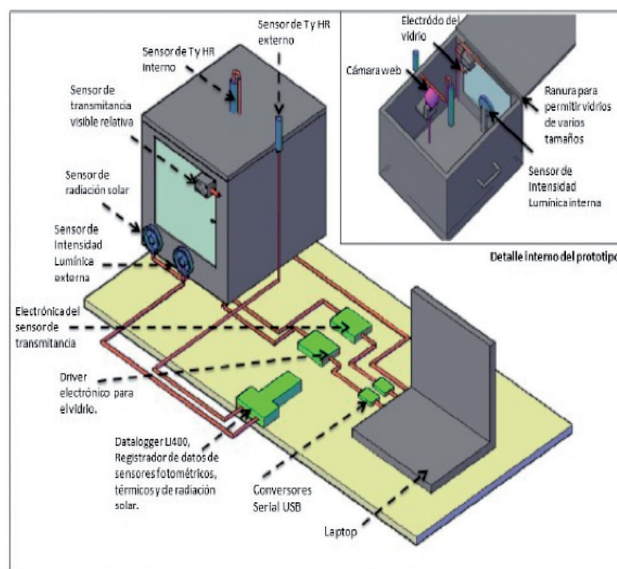


Figura 2. Prototipo diseñado y construido para las pruebas de control de luz día.

Una breve descripción de la estructura del sistema se expone a continuación:

Un actuador electrónico convierte el código hexadecimal, V code (0x00h-0x24h), equivalente a 36 niveles de voltaje proveniente del ordenador, en un voltaje eficaz, V_{rms} (6-114v), de la señal de voltaje alterno proveniente de la red eléctrica y, así, excita al dispositivo de partículas suspendidas SPD. El SPD responde a dicha excitación alineando las partículas de su interior que hacen variar de forma dinámica la transmitancia de luz visible del material. Un sensor fotométrico recibe el cambio de luz emitida por un haz de luz direccional que atraviesa el dispositivo SPD y dicho cambio es convertido en voltaje de continuo (0-5v), el cual es proporcional a la transmitancia de luz visible T_v (0-1). Por medio de un circuito electrónico, la señal analógica proveniente del fotosensor es tratada y convertida en un código hexadecimal T_v code (0x00-0xFF), es decir, en 256 niveles, quedando a disposición de lectura del ordenador que actúa como controlador digital y decide sobre las señales transmitidas al actuador para mantener estable el valor deseado de transmitancia. Tanto el actuador como el sensor fueron diseñados y fabricados en base a microcontroladores PIC.

La medición de transmitancia de luz visible atribuida a determinado material traslúcido (1), es una medida normalizada o porcentual de la cantidad de luz que atraviesa dicho material.

$$T_v = \frac{I_{int} [\mu W]}{I_{ext} [\mu W]} \quad (1)$$

La medición de dicha variable en forma directa no resulta económicamente práctica. De esta forma, se diseñó y construyó un sensor de par emisor-receptor de luz visible, debidamente sincronizado espectralmente en el rango de visibilidad del ojo humano, basado en un diodo led de luz blanca y un fotoreceptor de luz ambiente con filtro IR de bajo costo, cuyo comportamiento fue validado con un sensor fotométrico LI210SA de la empresa Li-Cor

tecnologías. Los resultados de dicha validación se presentan en la Figura 3.

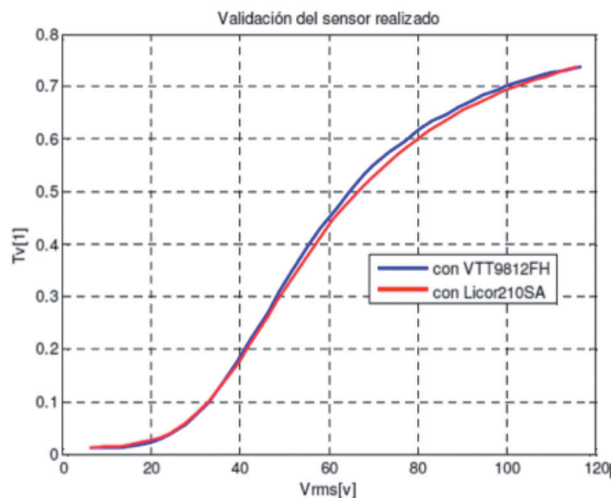


Figura 3. Curva de entrada-salida del dispositivo SPD.

D. Modelamiento

Un análisis a profundidad es necesario para modelar el movimiento de las macropartículas “electrophoretic” que cambia de manera uniforme la transmitancia de un dispositivo SPD; por tal razón, un modelamiento basado únicamente en el análisis teórico queda por fuera del alcance de este trabajo. En consecuencia, se hizo conveniente obtener y validar un modelo de forma experimental con técnicas de identificación, siendo una buena práctica tanto para verificar los datos suministrados por el fabricante como para observar comportamientos que los fabricantes no incluyen en sus hojas de datos, tales como las constantes de tiempo y el retardo entrada-salida.

Asumiendo el sistema lineal dentro del rango (8-50% de transmitancia), como se observa en la Figura 3, se realizó una prueba para obtener datos de entrada-salida, con el fin de identificar un modelo lineal. Se inyectó a la planta una señal binaria pseudoaleatoria conocida como “PBRs” que recorre todo el rango lineal con tiempo de muestreo 0.3s y probabilidad de nivel bajo de 0.4. La salida medida de la transmitancia frente a la entrada es ilustrada en la Figura 4.

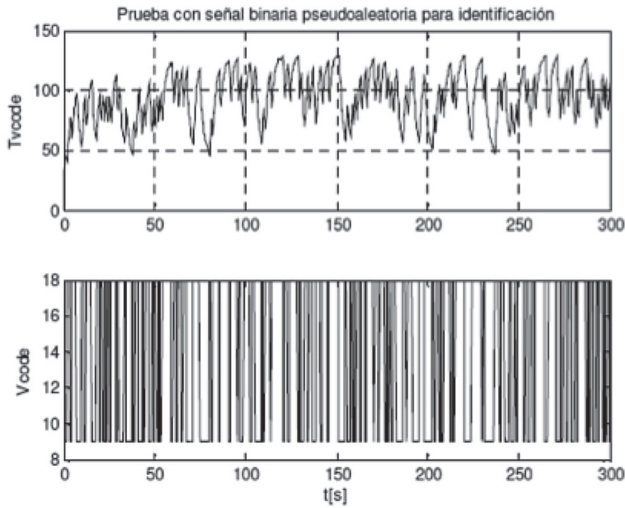


Figura 4. Obtención de datos para identificación

Con tales datos de entrada-salida y el uso de herramientas computacionales como el caso del “identification toolbox” de Matlab®, se estimaron varios modelos de diferentes estructuras, orden y número de parámetros. Para su comparación, fue calculado el acople de los modelos frente a los datos experimentales en el tiempo y en la frecuencia. El modelo escogido tiene su representación discreta en espacio de estados en (2, 3, 4, 5), donde $x[k]$: representa el vector de estados, $u[k]$: la entrada del comando de voltaje, $e[k]$: entrada de ruido blanco, $y[k]$: la salida o el código de transmitancia visible del SPD, y T_s : el tiempo de muestreo. Las comparaciones entre el modelo y los datos experimentales se ilustran en la Figura 5a) y 5b). Allí se muestra un acoplamiento del 92%. Dicho modelo fue validado a través de un análisis de residuos [12] o diferencias entre el modelo y los datos experimentales. La evaluación consiste en determinar la autocorrelación de los residuos y la correlación cruzada de los residuos con la entrada al sistema, con el fin de encontrar independencia entre los residuos y la entrada. Es posible notar en la Figura 5c) que los residuos están en la región de confiabilidad demarcada con color amarillo, lo que indica que la prueba de independencia es satisfactoria, por tanto el modelo obtenido es un modelo adecuado para el diseño del controlador.

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,061 & 0,781 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,004 \\ 1,5263 \end{bmatrix} u[k] + \begin{bmatrix} 1,0983 \\ 1,129 \end{bmatrix} e[k] \quad (2)$$

$$y[k] = x_1[k] \quad (3)$$

$$x[0] = \begin{bmatrix} -31,846 \\ -23,311 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_s = 0,3s \quad (5)$$

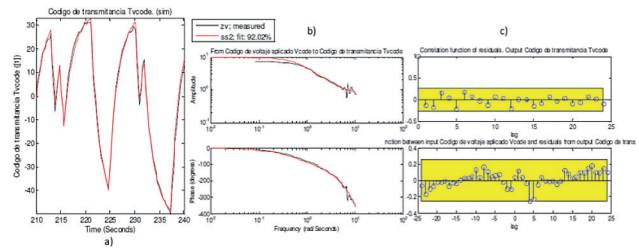


Figura 5. a) Acople del modelo escogido en el tiempo. b) En la frecuencia. c) Análisis de residuos.

E. Control PI vectorial basado en un estimador de estados

Para el diseño del controlador se tuvieron en cuenta ciertas especificaciones deseadas elegidas de acuerdo a la aplicación: Punto de operación variable, debido a que el sistema posteriormente obedecerá a otro controlador; error de estado estable cero; y sobre-pico muy pequeño, al no ser necesario ser estricto en la velocidad de respuesta. Para el diseño del controlador, en primer lugar, luego de un manejo computacional, se aproximó el modelo discreto a un modelo de función de transferencia en tiempo continuo representado en (6).

$$G(s) = \frac{39,4575}{(s + 7,705)(s + 0,5244)} e^{-0,3s} \quad (6)$$

Y su equivalente representación en espacio de estados en (7).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0,5244 & 1 \\ 0 & -7,705 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 8 \end{bmatrix}}_B u \quad (7)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 4,932 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Cuantitativamente, las especificaciones de diseño se basaron en elegir un tiempo de asentamiento $t_s = 8s$ y un sobre-pico de $SP = 1\%$ para el sistema de lazo cerrado. Dichas especificaciones definen una región de diseño en el plano complejo, donde deben ubicarse los polos de lazo cerrado. En (9,10) se ilustra el sistema en lazo cerrado añadiendo la integral (9) del error como un nuevo estado y así adicionar una acción integral al controlador, la cual garantiza el error entre la salida y referencia igual a cero.

$$\epsilon = \int (r(t) - y(t)) dt \quad (9)$$

La señal de control del sistema es una realimentación de estados (Ec.10), es el vector de ganancias de realimentación de estados. Este tipo de sistema de control es conocido como “PI vectorial” [13].

$$u(t) = -K_x x(t) - K_I \epsilon(t) \quad (10)$$

Donde:

$$K = [K_x \quad K_I] \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\epsilon} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A - BK_x & -BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_{lc}} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (12)$$

$$y = [C \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} \quad (13)$$

Deben elegirse valores para el vector K que garanticen que los valores propios de la matriz A_{lc} que representan los polos del sistema en lazo cerrado, se encuentren dentro de la región de diseño dada por las especificaciones. Con ayuda de Matlab®, es posible calcular el vector de ganancia de realimentación de estados por asignación de polos. Por otra parte, los controladores que utilizan realimentación de estados deben conocer el vector de estados, pero debido a que éstos son variables que generalmente no representan variables físicas medibles, deben calcularse con un estimador u observador asintótico de estados a partir de la entrada $u(t)$ y salida $y(t)$ medible de la planta (la transmitancia del vidrio). Dicho estimador es representado por (14).

$$\frac{d}{dt} (x - \hat{x}) = (A - LC)(x - \hat{x}) \quad (14)$$

Donde \hat{x} , representa el vector de estado estimado y L el vector de ganancia del observador. Por tanto, al garantizar que los valores propios de la matriz $A-LC$, los cuales representan los polos en (14), hagan estable dicha ecuación, el error $(x - \hat{x})$ que representa la diferencia entre los estados reales del proceso y los estimados tenderán a cero.

Una vez esto garantizado el controlador podrá utilizar como información de entrada los estados estimados. El sistema basado en controlador-observador finalmente diseñado para ejecutar una simulación ligada a la realidad del sistema de control, se ilustra en la Figura 6. Con la misma estructura del modelo en Simulink®, se ejecutó la implementación real, pero en su modo “external”, reemplazando el modelo por bloques de entrada y salida que utilizan el puerto serial para enviar y recibir comandos al sensor de transmitancia de luz visible y al driver electrónico del SPD respectivamente. Esto fue posible gracias a la utilización de las herramientas “Real Time Workshop” y “Real Time Windows Target”, que permiten al sistema trabajar en tiempo real, haciendo que el mismo sistema operativo Windows® respete el tiempo de muestreo definido para ejecutar los cálculos de Matlab®.

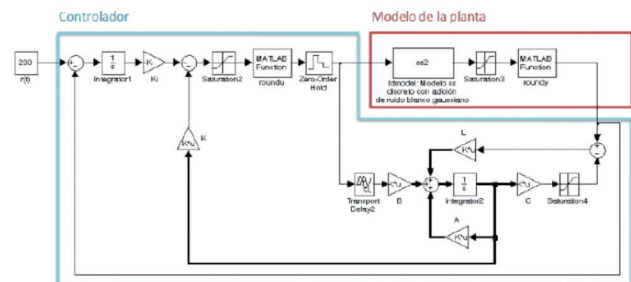


Figura 6. Estructura de simulación real del sistema

III. Resultados

En la Figura 7 se ilustra una comparación de resultados entre la simulación y los datos reales tomados de la planta, frente a cambios en la referencia

y perturbaciones externas. Los dos gráficos de la izquierda corresponden a una referencia de señal cuadrada que cambia su magnitud con el tiempo, una perturbación de magnitud 50 a la salida es inyectada en $t = 180s$ para observar el desempeño del control. La magnitud de la referencia barre todo el rango de transmitancia del vidrio, incluyendo la sección no lineal; a pesar de esto, el controlador se comporta satisfactoriamente en todo el rango. Los gráficos de la derecha corresponden a una prueba de seguimiento de la referencia cuando ésta es una señal senoidal, igualmente una perturbación es inyectada en $t = 250s$. Los resultados de ambas pruebas son satisfactorios, puesto que cumplen las especificaciones deseadas y responden rápidamente a las perturbaciones externas no deseadas.

IV. Conclusiones

En primer lugar, se obtuvo un conocimiento en un tema sin precedentes en el país y con bastantes aplicaciones; principalmente, en el diseño eficiente de fachadas, ya que dichas tecnologías tienen un fuerte impacto sobre la luz natural y cargas térmicas que penetran las edificaciones. De acuerdo a trabajos anteriores, los beneficios energéticos que pueden traer el empleo de una tecnología cromogénica en

fachadas se encuentra dentro del rango del 27-54,8% frente a sistemas convencionales de ventana en climas donde predomina la refrigeración.

Un análisis comparativo de las diferentes tecnologías cromogénicas favoreció a los dispositivos de partículas suspendidas o *SPDs* como la mejor. Posteriormente, se ha presentado un proceso metodológico para la identificación y control bajo un enfoque clásico de espacio de estados y fue probado satisfactoriamente tanto en simulación como de forma experimental. Los experimentos realizados en la etapa de modelamiento, específicamente del comportamiento de la transmitancia de luz visible, brindaron datos y registros de dicho comportamiento dinámico que escasea en el campo académico de las tecnologías emergentes, lo cual es muy útil para futuros trabajos enfocados desde el punto de vista de control. El prototipo diseñado es apto para futuros trabajos, como las pruebas a distintas tecnologías, estructuras o sistemas de ventana. El hardware y software diseñado tuvo muy buenos resultados, haciendo que este tipo de sistemas esté listo para ser integrado en un sistema de control más general que incluya, además de estos actuadores o válvulas de luz, otros sistemas como el de dimerización de la luz y *HVAC*, para lograr así diseños

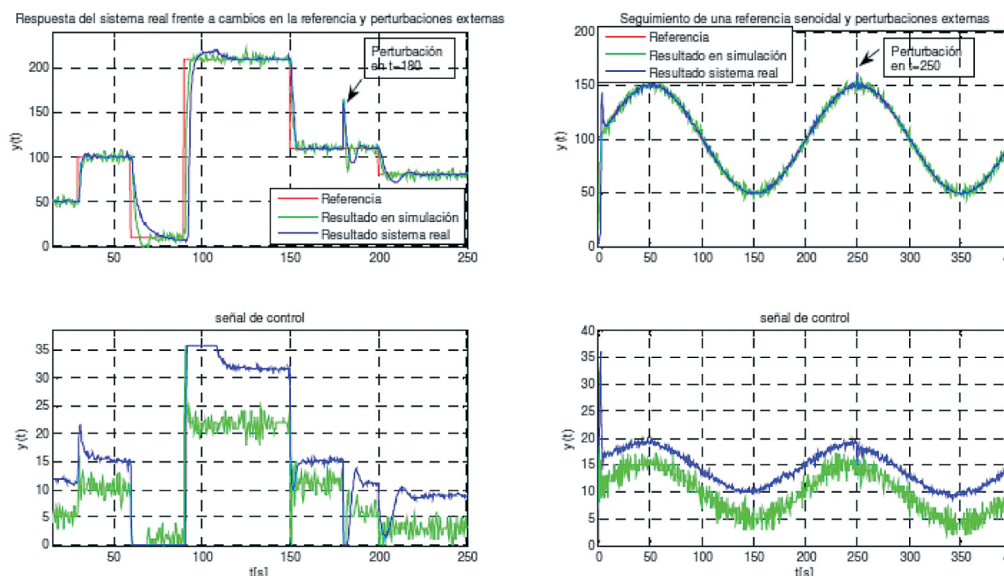


Figura 7. Respuesta del sistema real y de simulación frente a cambios en la referencia y perturbaciones externas.

de edificaciones realmente eficientes que logren el confort deseado en todo tiempo, independientemente de las condiciones ambientales del lugar, al menor costo energético posible. Este proyecto es una parte de ese direccionamiento y se espera en un futuro próximo realizar pruebas a escalas mayores.

Referencias

1. J.F. Kreider, P. Curtiss and A. Rabl, Heating and cooling of Buildings: Design for efficiency, McGraw Hill, Colorado USA 1994. B. Lee, "Advancement of electrochromics windows", Final Project Report Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley California, 2006.
2. B. Lee, "Advancement of electrochromics windows", Final Project Report Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley California, 2006.
3. R. Sullivan, M. Rubin and S. Selkowitz, "Reducing residential cooling requirements through the use of electrochromic windows", presentado en Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI Conference, Clearwater Beach, USA, 1995.
4. R. Sullivan, M. Rubin and S. Selkowitz, "Energy Performance Analysis of Prototype Electrochromic Windows", ASHRAE Transactions, Vol. 103, pp. 149—156, 1997.
5. E.S. Lee, D.L. DiBartolomeo and S.E. Selkowitz, "Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: Field study results", Journal Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 30- 44, 2006.
6. P.A.B. James and A.S. Bahaj, "Smart glazing solutions to glare and solar gain: a 'sick building' case study", Journal Energy and Buildings, Vol. 37, pp. 1058-1067, 2005.
7. J. Karlsson, "Control system and energy saving potential for switchable Windows", presentado en Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil. pp. 199-206, 2001.
8. A. Raicu, H. Rose, W. Nitz, W. Platzer, V. Wittwer and E. Jahns, "Facade systems with variable solar control using thermotropic polymer blends", Journal Solar Energy, Vol. 72, pp. 31-42, 2002.
9. C. M. Lampert, "Smart switchable glazing for solar energy and daylight control", Journal Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 52, pp. 207-221, 1998.
10. C. M. Lampert, "Chromogenic smart materials", Journal Materials Today, Vol. 7, pp. 28-35, 2004.
11. C. M. Lampert, "Optical switching technology for glazings", Journal Thin Solid Films, Vol. 236, pp. 6-13, 1993.
12. L. Ljung, *System Identification: Theory for the user*, Prentice Hall, 1999.
13. H. Diaz, "Notas de clase Fundamentos de Control", Universidad Nacional de Colombia. 2007.