



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **CONTROL DE TRANSMITANCIA DE LUZ VISIBLE EN FACHADAS DE EDIFICIOS MEDIANTE ACRISTALAMIENTOS DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS SPD**

**Jairo Alberto Andrade, jaandradeh@unal.edu.co<sup>1</sup>**

**Fabio Emiro Sierra, fesierav@unal.edu.co<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Cra. 30 No. 45-03 Ed. 411, Lab. Energía Renovable y Plantas Térmicas.

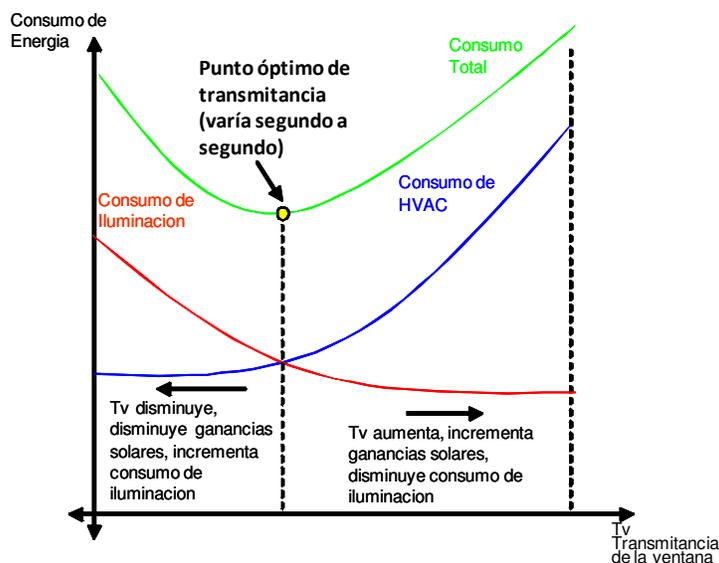
**Resumen:** Se presentan los resultados de modelamiento y control de una ventana de tecnología moderna realizada de material cromogénico. La tecnología de partículas suspendidas SPD empleada en fachadas de edificios y viviendas permite regular continuamente la cantidad de luz visible y calor solar entrante a la construcción a través de acciones eléctricas. Con el propósito de mejorar la precisión y confiabilidad en la regulación de la transmitancia de luz visible se ha implementado un sistema de control realimentado. Se diseñó y construyó un prototipo experimental a pequeña escala para las pruebas realizadas. Una característica estática no lineal fue obtenida mediante experimentación y un sistema de 2<sup>do</sup> orden encontrado a través de métodos de identificación representó fielmente la dinámica del sistema. El diseño del controlador fue ejecutado bajo un enfoque clásico de espacio de estados y fue probado satisfactoriamente tanto en simulación como de forma experimental.

**Palabras-clave:** Dispositivos de Partículas suspendidas SPD, Identificación de sistemas, Materiales cromogénicos, Sistemas de control de luz día, Control de transmitancia.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de control de luz día se presentan en la actualidad como un mecanismo de aprovechamiento natural de energía. Su óptima integración tecnológica con sistemas de iluminación artificial y sistemas HVAC (“Heating, Ventilation and air conditioning”), genera un importante recurso para lograr la eficiencia energética que exigen las construcciones modernas. El interés hacia las ventanas se presenta cuando éstas definen en gran parte la carga térmica y lumínica del edificio y a su vez, parte de la demanda eléctrica, como lo menciona Kreider en (1994). En el marco de lugares de clima cálido, si las ventanas bloquean en gran porcentaje la luz solar, disminuyen las necesidades de refrigeración y aumentan las necesidades de iluminación artificial, mientras que si las ventanas permiten en gran proporción el paso de la luz solar, el efecto es inverso como se ilustra en la Fig. 1. En consecuencia existirá un punto óptimo en la transmitancia de la ventana donde se maximiza la oportunidad de ahorro energético. En adición, dicho punto no es estático debido a que las magnitudes de la luz solar son dependientes del tiempo, sus valores varían de acuerdo a la hora del día y época del año. Las ventanas de material pasivo, usadas para el bloqueo de la luz solar, brindan la posibilidad de disminuir el consumo energético dentro de intervalos de tiempo, mientras que las ventanas fabricadas con materiales activos, especialmente aquellas con la propiedad de regular la transmitancia de luz de manera continua, brindarán a la fachada, la posibilidad de adaptarse dinámicamente a las condiciones variables de la luz solar y de esta forma, se logrará la optimización como proceso de minimización del consumo energético ya no en un intervalo, sino en todo tiempo t. Como lo menciona Lee en (2006) “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”.

La regulación de transmitancia en las ventanas es posible con el empleo de materiales cromogénicos, los cuales brindan dicha capacidad bajo la influencia de cierta señal de excitación, Lampert en 1993, 1998 y 2004 ha tratado las distintas características de los materiales cromogénicos. Varios trabajos (Lee, 2006; Sullivan, 1996; Sullivan, 1997; DiBartolomeo, 2006; James, 2005; Karlsson, 2001; Raicu, 2002) han mostrado la potencialidad del ahorro energético con el uso de ventanas fabricadas con materiales cromogénicos, es ilustrado que con un diseño eficiente es posible lograr ahorros en el consumo anual de electricidad entre el 27-55%.



**Figura 1. Oportunidad de disminución del consumo de energía con transmitancia variable de ventanas.**

En este trabajo se ha empleado una ventana de partículas suspendidas SPD. Dicha tecnología junto a “Electrochromics” EC conforman la categoría de los cromogénicos que pueden regular continuamente su nivel de transmitancia de luz en un rango típico del 0-70%, mediante la variación de un voltaje de entrada.

Respecto al desempeño de sistemas de ventana con SPD, si el objetivo es lograr una apariencia visual uniforme entre paneles adyacentes independientes, es fundamental garantizar la precisión en el control de la transmitancia y minimizar la diferencia entre ellos. Un sistema de control impreciso hace notable la diferencia en el color final obtenido, por tanto los beneficios de la tecnología no serán aprovechados en su totalidad, al no cumplir con el aspecto estético. Resultados experimentales de trabajos con EC’s en (Lee, 2006; DiBartolomeo, 2006) muestran que los controles sin realimentación no son 100% adecuados para garantizar la uniformidad necesaria ya que su precisión depende de un conocimiento exacto de la característica estática de entrada-salida de cada panel en particular. Otras razones como presencia de perturbaciones de origen eléctrico (teniendo en cuenta que los SPD se alimentan con Vac de la red eléctrica) y/o ambientales externas (al ser ventanas intemperie expuestas a cambios bruscos de temperatura, humedad y radiación solar), fueron causa del diseño y construcción de un sistema de control realimentado para el SPD, ya que solo los sistemas en lazo cerrado pueden garantizar el comportamiento preciso de sistemas donde existen perturbaciones e incertidumbres acerca del modelo como es el caso.

Con excepción de Vergaz en (2007) existen pocos trabajos realizados con SPD’s que atestigüen un suficiente enfoque hacia el modelamiento y control, y muy pocos con pruebas experimentales. Por tal razón este informe contribuye a conocer el problema de los SPD’s desde el punto de vista de control, y de ésta manera preparar las condiciones para incluirlos dentro de sistemas de optimización energética en edificios. Por el momento se ha tratado el problema de la luz visible, en un futuro el prototipo construido será empleado en pruebas que incluyan los estudios de impacto térmico que brindan los SPD’s.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Dispositivos de partículas suspendidas SPD

Típicamente se compone de 7 capas: 2 paneles de vidrio o plástico, 2 capas de material conductor transparente (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 dieléctrico del capacitor). Las partículas son “electrophoretic particles” de forma alargada, pigmentadas de un color oscuro. Estas partículas al estar cargadas eléctricamente pueden girar y ordenarse en presencia de un campo eléctrico, debido a un proceso llamado “electrophoresis”. Este movimiento se presenta debido a la fuerza de coulomb  $\vec{F} = q\vec{E}$ , la cual relaciona las propiedades eléctricas del cuerpo y las características del campo aplicado.

Sin presencia de campo eléctrico, la orientación de las partículas 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 ángulo 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, como se observa gráficamente en la Fig. 2.

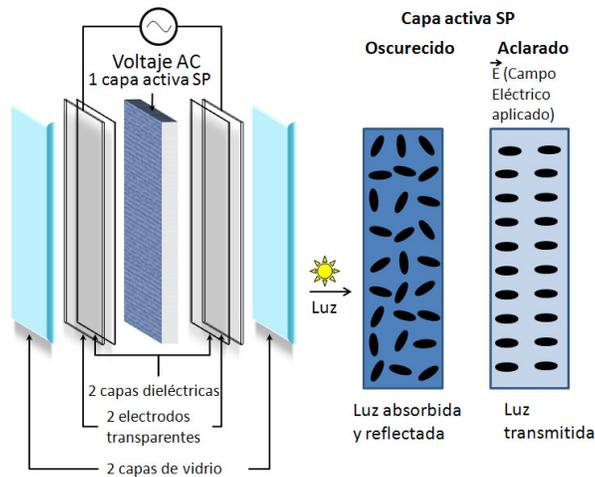


Figura 2. Composición de un dispositivo de partículas suspendidas.

## 2.2. Descripción del sistema

Para el diseño del módulo físico se ha tenido en cuenta además de la medición de la variable de interés directo (transmitancia de luz visible  $T_v$ ), otras variables tales como la radiación solar que llega de forma perpendicular a la cara externa de la ventana, la radiación entrante, la temperatura externa y la temperatura interna, para observar de forma experimental su influencia o no sobre la transmitancia.

Una breve descripción de la infraestructura ilustrada en la Fig.3 se menciona a continuación: Un actuador electrónico encontrado en la figura como “Driver electrónico para el vidrio” convierte 36 comandos de voltaje proveniente del ordenador, en niveles de 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. La transmitancia de luz visible del material del SPD responde a dicha excitación de forma dinámica. 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), éste cambio 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  $T_vcode$  (0x00-0xFF), 256 niveles, quedando a disposición de lectura del ordenador quien actúa como controlador digital y decide sobre las señales transmitidas al actuador de acuerdo a la referencia deseada. Tanto el actuador como el sensor fueron diseñados y fabricados basados en microcontroladores PIC. El anterior proceso también es ilustrado esquemáticamente en el diagrama de bloques de la Fig. 4.

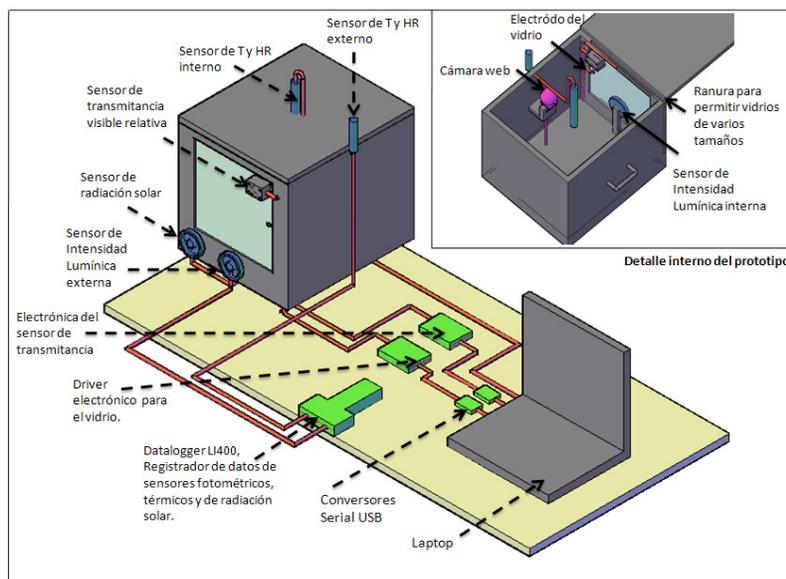


Figura 3. Prototipo construido para las pruebas de control de luz día.

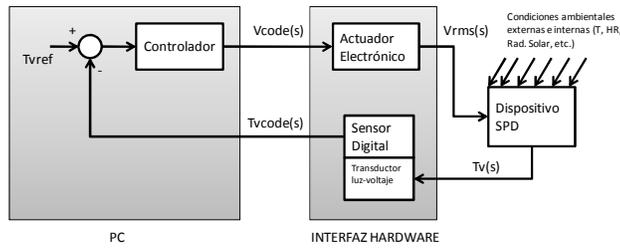


Figura 4. Sistema de control realimentado para el dispositivo SPD.

La medición de transmitancia de luz visible atribuida a determinado material traslúcido definida en la Ec. (1), es una medida normalizada o porcentual de la cantidad de luz que atraviesa el material. La medición de dicha variable en forma directa implicaría utilizar un sensor fotométrico intemperie con capacidad de medir las intensidades de la luz solar, lo cual no es económicamente práctico. Por tanto, se diseñó y construyó un sensor par emisor-receptor de luz visible, espectralmente sincronizados 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, para medir la variable localmente. Los resultados fueron validados con un sensor de alto desempeño con certificado de calibración y la comparación se puede observar en la Fig. 5.

$$T_v = \frac{I_{interior}[lux]}{I_{exterior}[lux]} \quad (1)$$

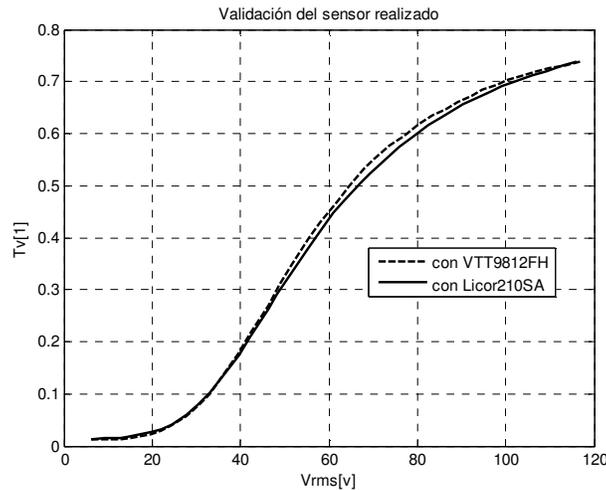


Figura 5. Curva de entrada-salida del dispositivo SPD.

### 2.3. Característica Estática

En la Fig. 5 se ilustra la característica estática del SPD estudiado, hallada de forma experimental. La entrada es el voltaje rms aplicado y la salida es la transmitancia de luz visible normalizada. La forma de la respuesta es no lineal, un pequeño offset representa que el SPD en su estado más oscuro deja pasar un 1.3% de la luz entrante. Una pequeña zona muerta o de muy baja ganancia se presenta entre los 0 y 15Vrms. Una región comprendida entre los 30 y 65 Vrms correspondiente a un rango del 8 al 50% de transmitancia puede ser aproximada a lineal. Posteriormente de los 65 a los 120Vrms la ganancia estática disminuye gradualmente conforme aumenta el voltaje.

### 2.4. Modelamiento Dinámico

Un modelamiento eléctrico que define la impedancia del dispositivo SPD mediante un circuito equivalente no lineal ha sido hallado por Vergaz en (2007) mediante el empleo de la impedancia Warbug para representar el efecto “electrophoretic”. También fue estudiado allí el contenido espectral de la luz que atraviesa el vidrio, frente a la variación de la transmitancia. Entre tanto, para modelar dinámicamente el cambio en el tiempo y frecuencia de la transmitancia frente a los cambios en la señal de entrada es indispensable un análisis a profundidad del movimiento de las micropartículas “electrophoretic” que hace cambiar de manera uniforme la transmitancia de un dispositivo SPD. Este tipo de análisis teórico se encuentra por fuera del alcance de este trabajo, en consecuencia se hizo conveniente obtener y validar un modelo de forma experimental, mediante técnicas de identificación.

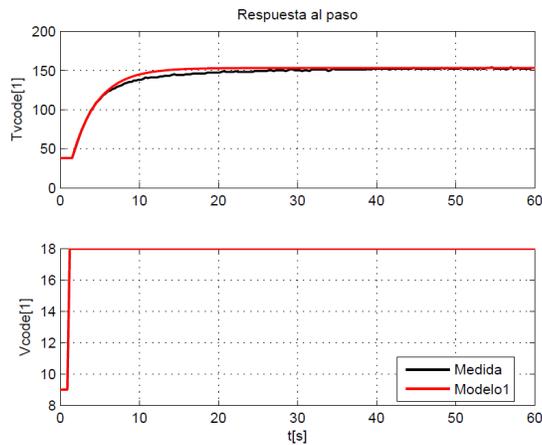


Figura 6. Respuesta al paso del sistema.

La respuesta al escalón hallada experimentalmente se ilustra en la Fig. 6. Las magnitudes allí presentadas se encuentran en función de las variables  $T_{vcode}$  y  $V_{code}$ , cuyas relaciones con las variables  $T_v$  y  $V_{rms}$  reales se presentan en las Ec. (2, 3). Es posible observar allí ciertos comportamientos como el tiempo de asentamiento  $t_s \leq 8s$ , un retardo de transporte de una muestra con un tiempo de muestreo  $T_s = 300ms$ .

$$V_{rms} = 3V_{code} + 6 \tag{2}$$

$$T_{vcode} = 310,325T_v + 0,06 \tag{3}$$

La respuesta transitoria del sistema, brinda información inicial importante para el análisis, sin embargo por su simpleza, es muy probable que un modelo basado únicamente en dicha respuesta, no reproduzca con exactitud la totalidad de características dinámicas del sistema en estudio, por tal motivo fueron necesario otros experimentos que permitan obtener datos con información más significativa. Asumiendo el sistema lineal dentro del rango (8-50% de transmitancia) como se mencionó en la anterior sección, 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 codificada y la entrada codificada es ilustrada en la Fig. 7.

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 las Ec. (4,5,6).

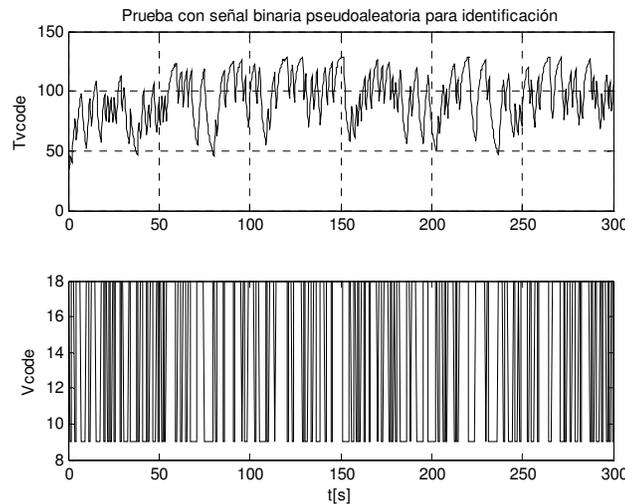


Figura 7. Obtención de datos para identificación.

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.061 & 0.781 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.004 \\ 1.5263 \end{bmatrix} u[k] + \begin{bmatrix} 1.0983 \\ 1.129 \end{bmatrix} e[k] \quad (4)$$

$$y[k] = x_1[k] \quad (5)$$

$$T_s = 0.3s \quad (6)$$

Donde  $x[k]$ : representa el vector de estados,  $u[k]$ : la entrada del comando de voltaje Vcode (0-36),  $e[k]$ : entrada de ruido blanco,  $y[k]$ : la salida o el código de transmitancia visible del SPD Tvcode (0-256), y  $T_s$ : el tiempo de muestreo. Las comparaciones entre el modelo y los datos experimentales se ilustran en la Fig. 8a) y 8b). Allí se muestra un acoplamiento del 92%. Dicho modelo fue validado a través de un análisis de residuos como es ilustrado por Ljung en (1999), 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 Fig. 8c), 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 la simulación y el diseño del controlador. La función de transferencia en tiempo continuo equivalente de la Ec. (7), fue hallada utilizando una aproximación de tustin y de euler del sistema en tiempo discreto de las Ec. (4,5,6). En la Ec. (8) y Ec. (9) se presenta una representación en espacio de estados equivalente a dicha función de transferencia.

$$G(s) = \frac{39.4575}{(s + 7.705)(s + 0.5244)} e^{-0.3s} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0.5244 & 1 \\ 0 & -7.705 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 8 \end{bmatrix}}_B u \quad (8)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 4.932 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

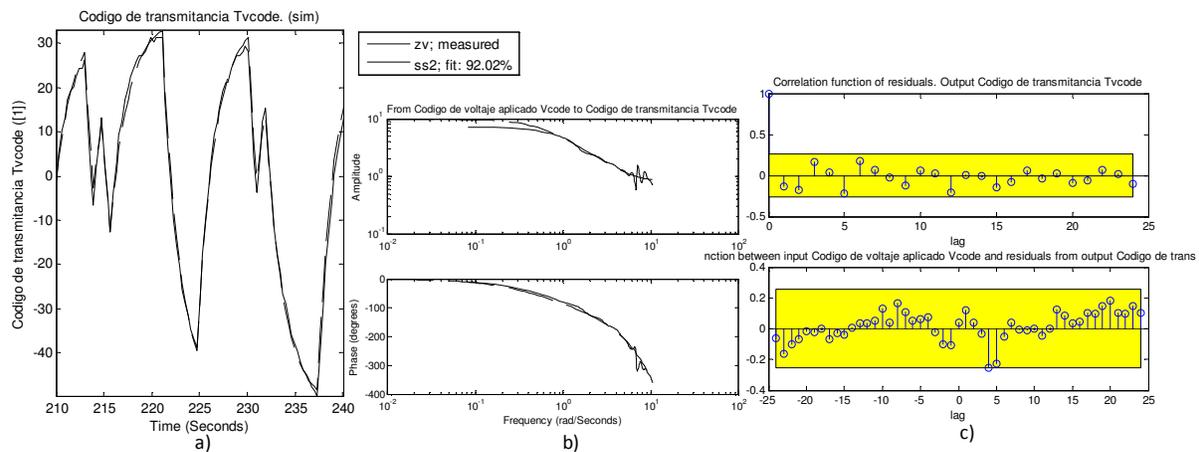


Figura 8. a) Acople del modelo escogido en el tiempo. b) En la frecuencia. c) Análisis de residuos.

### 2.5. Control por realimentación de variables de estado con acción integral 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 un controlador maestro, error de estado estable cero, sobrepico pequeño de 1% y velocidad de respuesta menor a 8s para evitar que el sistema realimentado altere significativamente los tiempos de respuesta del SPD.

Dichas especificaciones definen una región de diseño en el plano complejo donde deben ubicarse los polos de lazo cerrado. En la Ec. (10) se ilustra el sistema en lazo cerrado añadiendo la integral del error como un nuevo estado  $\epsilon = \int (r(t) - y(t))dt$ . Dicha acción agrega acción integral al controlador, la cual garantiza el error entre la salida y referencia igual a cero. Este tipo de sistema de control es conocido como “PI vectorial” tratado en Diaz en (2007).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\epsilon} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A - BK_x & -BK_f \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_{lc}} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (10)$$

$$y = [C \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} \quad (11)$$

Por tanto, el diseño del controlador consistirá en elegir valores para el vector  $K$  que garanticen que los valores propios de la matriz  $A_{lc}$  los cuales representan los polos del sistema en lazo cerrado, se encuentren dentro de la región de diseño definida por las especificaciones. La alternativa escogida para calcular el vector de ganancias de realimentación  $K$  con optimización fue el LQR (Linear Quadratic Regulator). Por tanto se calculan valores de tal forma que se minimice el funcional de costo de la Ec. (12).

$$J = \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (12)$$

Donde  $e$  representa el error entre el vector de estados aumentado y su valor en estado estable,  $u$  la entrada,  $Q$  será la matriz de ponderación del estado en el funcional de costo y deberá ser una matriz real, simétrica, semidefinida positiva.  $R$  funciona como matriz de ponderación de la entrada y deberá ser matriz real, simétrica, definida positiva. Se eligieron matrices  $Q$  y  $R$  en la Ec. (13) de tal forma que se diera un gran peso a la entrada con el objetivo de obtener una acción de control suave y mínima,

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = 200; \quad (13)$$

El vector de ganancias calculado con ayuda de Matlab tiene los valores de la Ec. (14).

$$\Rightarrow K = [K_1 \ K_2 \ K_f] = [0.473 \ 0.062 \ -0.07] \quad (14)$$

Nótese en el esquema de la Fig. 9, el signo negativo frente de la ganancia  $K_f$ , hace que la ganancia con signo negativo obtenida en (14) no corresponda a una realimentación positiva. El vector  $K$  obtenido genera una matriz de lazo cerrado  $A_{lc}$  de la forma en (15) la cual es una matriz estable, con valores propios en el semiplano izquierdo del plano complejo.

$$A_{lc} = \begin{bmatrix} -0.524 & 1 & 0 \\ -3.784 & -8.201 & 0.56 \\ -4.932 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Por otra parte, como el controlador es una realimentación de estados, se hace necesario conocer el vector de estados, pero debido a que éstos 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 se representa en la Ec. (16).

$$\frac{d}{dt}(x - \hat{x}) = (A - LC)(x - \hat{x}) \quad (16)$$

Donde  $\hat{x}$ , es 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 de la Ec. (16), 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. Escogiendo los polos del observador 5 veces menores que la parte real de los polos dominantes del control, se calculó el valor del vector  $L$ , en la Ec (17).

$$L = \begin{bmatrix} -0.046 \\ 2.58 \end{bmatrix} \quad (17)$$

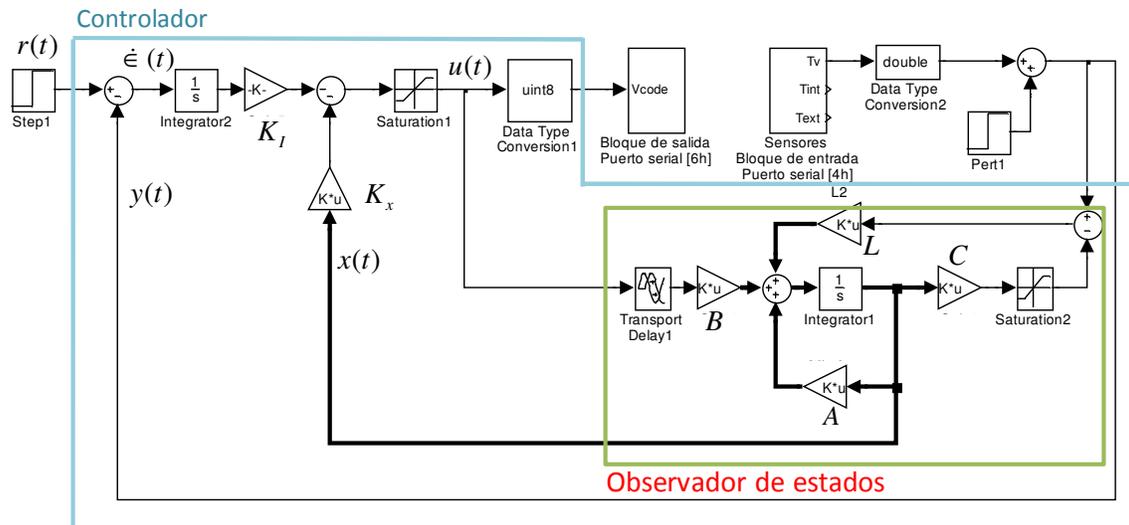


Figura 9. Estructura de del controlador real implementado en Simulink.

## 2.6. Implementación Real del sistema con Matlab® Real Time.

En la práctica debe tenerse en cuenta la saturación del actuador, la cual restringe la señal de control  $u(t)$  como se muestra en la Ec. (18), donde el rango de  $[0-36]$  es el rango de comandos  $V_{code}$  que recibe el actuador.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & u < 0 \\ -K_x x(t) - K_I \varepsilon(t) & 0 \leq u \leq 36 \\ 36 & u > 36 \end{cases} \quad (18)$$

Por otra parte, al trabajar en Simulink en su modo External, es posible trabajar en tiempo real. Con Real Time Workshop el esquema de Simulink es compilado en código C para que el cómputo sea realizado rápidamente. El toolbox interviene el kernel de Windows para que Matlab tenga prioridad y sea respetado el intervalo de muestreo, para este caso de  $T_s = 300ms$ . A través de Real Time Windows Target se implementan dos bloques: uno de entrada y otro de salida mediante dos puertos seriales, que permiten reemplazar el modelo usado en simulación, por la planta real como se observa en la Fig. 9.

## 3. RESULTADOS

En la Fig. 10 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 corresponde 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 corresponde 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 el sistema responde rápidamente a las perturbaciones externas.

## 4. CONCLUSIONES

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.

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 sobre el prototipo construido. Fue comprobado que el dispositivo de partículas suspendidas usado en ventanas, permite una regulación del 1 – 70% de la luz visible y del 20-40% de la luz infrarroja proveniente del exterior, por tanto su empleo como válvula de luz natural es adecuado para el aprovechamiento de energía eléctrica si se combina con sistemas de control automáticos de iluminación artificial y sistemas HVAC. Por otra parte, un modelo de segundo orden fue el más adecuado para representar la dinámica del

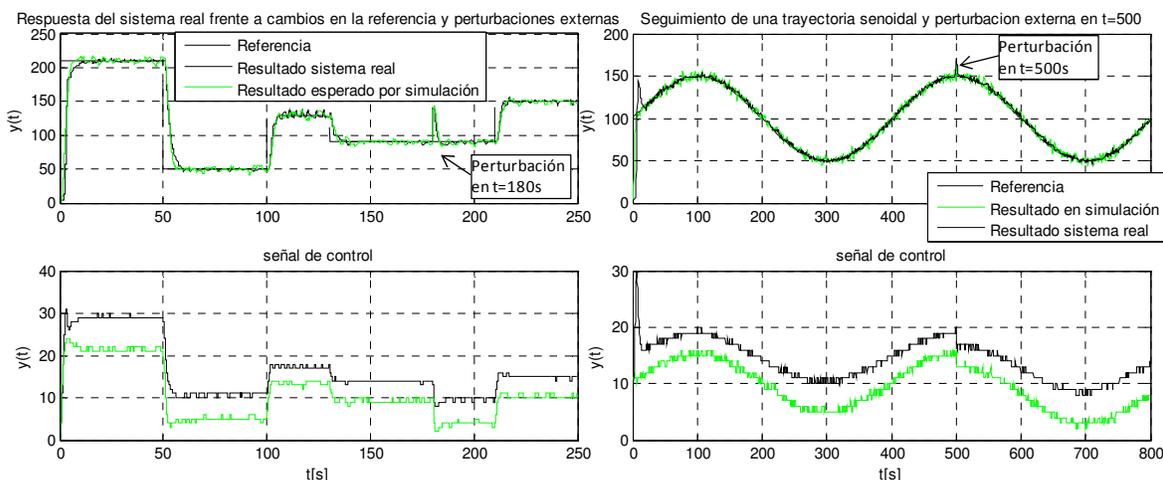


Figura 10. Respuesta del sistema real y de simulación frente a cambios en la referencia y perturbaciones externas.

SPD, luego de un amplio proceso de validación. El sistema de control maneja adecuadamente el SPD en todo su rango. Su comunicación serial en tiempo real es muy confiable al ser probado sin errores por largos periodos de tiempo. A pesar de dichos resultados, solo pudo ser probado en un vidrio de un solo tamaño debido a su difícil y costosa consecución, por tanto no se conoce su comportamiento frente a otros tamaños de vidrio y es un planteamiento para trabajos futuros. El control de lazo cerrado sobre las ventanas garantiza el valor de transmitancia independiente de perturbaciones tales como el cambio en los niveles de voltaje de la red eléctrica, cambios en la ganancia de lazo abierto del dispositivo que pudieran ocurrir con el tiempo y se espera garantice el control independiente del tamaño del vidrio. Se cumplieron los criterios de diseño, el tiempo de respuesta del sistema en lazo cerrado está por debajo de los 9s y el sobrepico es mínimo en todo el rango de referencia posible. También se realizaron pruebas de seguimiento, por tanto éste sistema de ventana responde a una referencia satisfactoriamente y está listo para ser gobernado por un controlador maestro que le indique el valor de transmitancia óptimo para cada instante de tiempo, basado en el análisis de las condiciones ambientales del lugar.

El SPD no es afectado considerablemente por la temperatura, las pruebas ante un rango de temperatura de 20–40 °C arrojaron una afectación de aproximadamente  $\pm 1\%$  en la medición de la transmitancia visible. Debido a la dependencia de los componentes del sensor con la temperatura como es el caso del led y el fotodiodo, se deduce que ésta variación se debe a ellos y no al SPD.

## 5. REFERENCIAS

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

Vergaz, Pena, Barrios, Pérez, and Torres, 2007. “Electrooptical behaviour and control of a suspended particle device”. *Opto-Electronics Review*, 15:154–158.

López, M. E., 2000. Identificación de sistemas aplicación al modelado de un motor de continua.

## 6. DERECHOS DE AUTOR

Los autores son los únicos responsables por el contenido del material impreso incluido en este trabajo.

# VISIBLE LIGHT TRANSMITTANCE CONTROL OF BUILDING FACADES WITH SUSPENDED PARTICLE DEVICES SPD GLASS

**Jairo Alberto Andrade**, jaandradeh@unal.edu.co<sup>1</sup>

**Fabio Emiro Sierra**, fesierrav@unal.edu.co<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Cra. 30 No. 45-03 Ed. 411, Lab. Energía Renovable y Plantas Térmicas.

**Abstract:** *Modeling and control of a modern technology window results has been presented. The suspended particle devices SPD technology for building facades allows both exterior visible light level continuous and heat solar gain regulation through electrical actions. In order to improve the accuracy and reliability of visible light transmittance regulation, a feedback control system was implemented. A scaled-down experimental prototype was designed and realized to make probes. A nonlinear static characteristic was obtained from experimentation, and a linear<sup>2<sup>nd</sup></sup> order from identification methods corresponds with the dynamic system. The controller design was developed through classic space states design and it was tested correctly through the simulation and real experiments.*

**Keywords:** *Suspended Particle Devices SPD, System Identification, Chromogenic Materials, Daylight Control Systems, Transmittance Control.*