MODELAMIENTO Y CONTROL DE UNA VENTANA DE MATERIAL CROMOGÉNICO

JAIRO ALBERTO ANDRADE HERNANDEZ
CÓDIGO: 02280191

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial

DIRIGIDO POR:
FABIO EMIRO SIERRA PH.D

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
Bogotá, 2009

Índice general

Índice de figuras **5**

Índice de tablas **9**

1. Introducción **11**
1.1. Objetivos 12
1.2. Contribuciones 12
1.3. Organización del documento 13

2. Marco Teórico **15**
2.1. Materiales Cromogénicos 15
2.1.1. Cromogénicos activados eléctricamente 18
2.1.2. Dispositivos *electrochromics* EC 19
2.1.3. Dispositivos de partículas suspendidas SPD 20
2.1.4. Análisis comparativo entre las tecnologías EC y SPD. . . . 21
2.1.5. Beneficios energéticos en las construcciones por el uso de tecnologías cromogénicas en fachadas. 23
2.2. Estado del arte 31
2.2.1. Sistemas de Control de luz día 31
2.2.2. Modelamiento de un dispositivo SPD 34
2.2.3. Control de un dispositivo SPD 37

3. Diseño del prototipo - Hardware y Software **41**
3.1. Planta Física 43
3.2. Actuador - Driver Electrónico 44
3.3. Sensores y Adquisición de señales 47
3.3.1. Sensor de transmitancia de luz visible 47
3.3.2. Sensores de temperatura 49
3.3.3. Interfaz de hardware para conexión con Matlab en tiempo real. 51

4. Modelamiento **55**
4.1. Descripción del sistema 55
4.2. Modelamiento Teórico 56
4.3. Obtención del modelo mediante métodos de Identificación. 59
4.3.1. Identificación no paramétrica en el dominio del tiempo mediante la respuesta transitoria. 59
4.3.2. Identificación paramétrica empleando System Identification Toolbox de MATLAB 60
4.4. Pruebas experimentales de temperatura. 71

5. Control **75**
5.1. Control con realimentación de variables de estado. 76
5.1.1. Especificaciones de diseño 76
5.1.2. Modelo de la planta en tiempo continuo. 78
5.1.3. Realimentación de variables de estado con acción integral. 78
5.1.4. Implementación del controlador mediante estimación de estados. 82
5.1.5. Otras consideraciones prácticas y resultados de simulación del sistema 85
5.1.6. Implementación real del sistema de control con Real Time Workshop y Real Time Windows Target de Matlab. 86
5.2. Cambios de temperatura. 90

6. Conclusiones. **93**
6.1. Trabajos futuros. 95

Nomenclatura **97**

Lista de Acrónimos **99**

Bibliografía **101**

Índice de figuras

2.1. Funcionamiento de un dispositivo *eletrochromics*. A)Estado Claro B) Estado Oscuro. Adaptado de [9]. 20

2.2. Esquema de la construcción de un acristalamiento de partículas suspendidas SPD. Adaptada de [21]. 21

2.3. Valores de Tv y SHGC para distintos tipos de ventana tanto activas *EC Electrochromics* como convencionales. Adaptado de [33]. . . . 25

2.4. Comportamiento típico del consumo eléctrico en función de la relación ventana-pared. 27

2.5. Consumo anual estimado de electricidad por refrigeración para diferentes tipos de ventanas con relación de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33]. 28

2.6. Consumo anual estimado de electricidad por iluminación para diferentes tipos de ventanas con relacion de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33]. 29

2.7. Consumo anual estimado de electricidad total para diferentes tipos de ventanas con relacion de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33]. 30

2.8. Consumo anual estimado de energía de calefacción para diferentes tipos de ventanas EC con relación de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33]. 31

2.9. a. Iluminación unilateral b. Iluminación bilateral c.Iluminación por techo d. Iluminación *Clerestory* e. Iluminación diente de sierra f. Iluminación claraboya g. Atrio. [27]. 32

2.10. Diagrama de un sistema de control de luz día con una ventana EC integrada. Adaptada de [22] 34

2.11. Circuito equivalente RC de una carga SPD con buses conductivos ubicados al mismo costado. Adaptada de [25]. 35

2.12. a) Diagrama de la transmisión de luz a través de una carga SPD típica contra el voltaje AC aplicado. b) Diagrama de la transmisión de luz a través de distintas cargas SPD comerciales contra el voltaje AC aplicado. Adaptada de [25] 36
2.13. Modelo experimental de impedancia. Adaptada de [35] 36
2.14. Modelo eléctrico equivalente de un dispositivo SPD (28x22cm) estudiado en [35] 38
2.15. Comportamiento lineal de los niveles de transmitancia garantizados por el dispositivo de control, [35] 38

3.1. Concepción previa del sistema. 42
3.2. Diseño del prototipo para las pruebas. 43
3.3. Prototipo construido. 44
3.4. Principio de funcionamiento de control por fase de onda senoidal [34]. 45
3.5. Diagrama de bloques del driver diseñado 46
3.6. Fotografía del actuador construido 47
3.7. Entrada-Salida del actuador electrónico 48
3.8. Sensor de transmitancia de luz visible. 49
3.9. Comparación de la respuesta espectral del par emisor-receptor empleado en sensor de transmitancia de luz visible. 50
3.10. Resultado del sensor 50
3.11. Transmitancia de luz en los espectros visible e infrarojo. 51
3.12. Diagrama de bloques de la interfaz de adquisición de señales diseñada 52
3.13. Fotografía de la interfaz sensorial 52

4.1. Diagrama de Bloques del sistema de control digital del dispositivo SPD 56
4.2. Respuesta al paso del sistema 57
4.3. Estructura teórica de la planta a identificar. 58
4.4. Respuesta al paso del modelo1 60
4.5. Obtención de datos para identificación 62
4.6. Estimación de la Respuesta al impulso del sistema. 63
4.7. Estimación de la Respuesta en frecuencia del sistema. 63
4.8. Comparación de la respuesta en frecuencia de distintos modelos. . 66
4.9. Comparación de la respuesta transitoria de distintos modelos. . . 66
4.10. Comparación de distintos modelos. 67
4.11. Acople del modelo escogido. 68
4.12. Respuesta transitoria del modelo escogido. 69
4.13. Respuesta en frecuencia del modelo escogido. 69
4.14. Analisis de residuos. 70

4.15. Disposición de las pruebas de temperatura. 72
4.16. Comportamiento del sistema sin control frente a cambios en la temperatura y radiación infraroja aplicada. 74

5.1. Región de diseño en el plano complejo. 77
5.2. Comparación modelo tiempo discreto y aproximación en tiempo continuo. 79
5.3. Sistema con PI vectorial. 80
5.4. Observador de estados asintótico. 83
5.5. Sistema de control basado en observador de estados. 84
5.6. Comparación del diseño y el sistema ideal. 84
5.7. Desempeño del observador con condiciones iniciales diferentes de cero 85
5.8. Estructura de simulación real del sistema. 86
5.9. Resultado respuesta al paso simulación del sistema completo. . . . 87
5.10. Estructura del controlador de la planta física real. 87
5.11. Resultados de la respuesta del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a una entrada tipo paso. 88
5.12. Resultados de la respuesta del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a cambios en la referencia y perturbaciones externas. 88
5.13. Imagen demostrativa del sistema SPD en distintas referencias. . . 89
5.14. Resultados del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a una referencia senoidal. 89
5.15. Comportamiento del sistema controlado frente a cambios en la temperatura y radiación infraroja aplicada. 91

Índice de tablas

2.1. Características de los materiales cromogénicos que se basan en un movimiento de masa discreta. 16
2.2. Características de los materiales cromogénicos que se basan en un movimiento físico colectivo. 17
2.3. Tabla comparativa entre productos EC y SPD conseguidos comercialmente. 22
2.4. Valores de transmitancia para materiales de vidrio y plástico empleados en ventanas. Adaptada de [27]. 33

4.1. Características de la prueba realizada para la obtención de datos experimentales de la planta SPD. 61
4.2. Estructuras para identificación. 64
4.3. Modelos estimados para comparación. 65

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a toda mi familia, padres y hermanos quienes día a día me brindan su apoyo y desean bienestar. A Patricia Lopera por su paciencia y comprensión. Al Ingeniero Fabio Sierra por haberme abierto las puertas para el desarrollo de éste proyecto, por su seguimiento y soporte. Al Ingeniero John Gonzalez por su apoyo incondicional en la ejecución de mis estudios. A mis compañeros y a todos los profesores del programa de Automatización Industrial de los cuales aprendí en sus grandiosas clases y asesorías.

Capítulo 1

Introducción

Es para los gobiernos una política y un fin, más para la ingeniería, una obligación: La eficiencia energética. Investigaciones en biomasa, energía solar, y tecnologías de edificios son grandes ejes temáticos en los que se trabaja hoy en día en cada uno de los departamentos de energía de los diferentes países. Es interés de este proyecto, trabajar el tema del ahorro de energía de las construcciones usando control automático.

En las construcciones, suele necesitarse mantener en pequeños rangos, algunas variables como la adecuada cantidad de lúmenes por área, la temperatura y humedad relativa, sin mencionar las variables relacionadas a la calidad del aire, ya sea para obtener confort humano o para obtener especificaciones en áreas especiales, como laboratorios, hospitales, archivos, etc. De forma convencional este problema ha sido enfrentado con el uso de sistemas HVAC (Heating, Ventilation and air conditioning), para la regulación de temperatura y humedad relativa, y con sistemas de iluminación que combinan la luz natural y la luz eléctrica para obtener el estándar lumínico. Múltiples alternativas son estudiadas para la optimización de dichos sistemas, al ser conocido que sin un diseño para la eficiencia, generan un mal uso de la energía así como un sobre costo de instalación cuando los sistemas son sobredimensionados.

Esta tesis tiene su enfoque en los sistemas de control de luz día, como un mecanismo de aprovechamiento natural de energía, que con una óptima integración tecnológica con los sistemas HVAC y sistemas de iluminación eléctrica, son un recurso potencial de ahorro energético en las construcciones modernas.

El punto a tratar son las ventanas, las ventanas son un elemento fundamental de las fachadas, y estas a su vez definen una gran parte de la carga térmica del edificio y por tanto, de su demanda eléctrica, [16]. Entonces si las ventanas u otros dispo-

sitivos de sombra dejan de ser elementos pasivos y por el contrario se convierten en elementos activos de tal manera que se adapten a las condiciones ambientales térmicas y de intensidad lumínica externas, las ventanas terminan 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" [22]. Algunos trabajos ya han estudiado la potencialidad del ahorro energético, tales como Sullivan y Rubin [32], [33] donde bajo ciertas condiciones, el empleo de dispositivos *electrochromics* brindan reducciones importantes en la carga eléctrica de un edificio. Las virtudes anteriormente mencionadas de los materiales cromogénicos y la utilización del control frente al ahorro energético, son la principal motivación de este proyecto.

1.1. Objetivos

Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de control basado en PC, usando software en tiempo real para regular la transmitancia de luz visible de una ventana de material cromogénico.

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un prototipo a escala de una zona simple dotada con un sistema de control de luz día que se ajuste a las necesidades de las pruebas.
- Encontrar y validar un modelamiento dinámico del comportamiento de la transmitancia de luz visible de la ventana bajo la influencia del campo eléctrico aplicado y de la temperatura externa.
- Diseñar y simular un sistema de control que lleve el sistema al valor deseado y que garantice mantener el valor de transmitancia dentro de un rango preciso.
- Implementar el controlador a través de software en tiempo real.

1.2. Contribuciones

La presente investigación se desarrolló sin antecedentes conocidos del mismo tipo en el país y su interés se basó en las potenciales aplicaciones en el diseño eficiente de fachadas debido a que al emplear materiales cromogénicos en su composición, se brindan características dinámicas interesantes y de adaptabilidad al

medio ambiente. Dichas tecnologías tienen un fuerte impacto sobre la luz natural y cargas térmicas que penetran las edificaciones. Numerosos trabajos han venido desarrollándose usando materiales cromogénicos en las fachadas por James [10], Karlsson [12], Lee [22], [23], Raicu [28] y han mostrado su valiosa utilidad. 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 como se menciona en Lee [23], esto debido en gran parte a que por el momento, son tecnologías comercialmente emergentes. Los experimentos realizados específicamente en este trabajo, sobre el comportamiento de la transmitancia de luz visible brindan datos y registros de dicho comportamiento dinámico experimental que escasea en el campo de la literatura académica referente a éstas tecnologías, sus resultados serán útiles para futuros trabajos enfocados desde el punto de vista de control. El prototipo diseñado es apto para futuros experimentos, como probar distintas tecnologías, estructuras o sistemas de ventana así como los estudios de impacto térmico que éstos dispositivos pueden llegar a brindar.

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 el desarrollo, diseño y construcción del hardware para el control de una ventana de tecnología SPD es un avance importante hacia la preparación de las condiciones necesarias para incluir ventanas cromogénicas dentro de sistemas de optimización energética en edificios. El hardware y software diseñado apunta hacia la integración 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 y lograr diseños de edificaciones realmente eficientes que logren el confort deseado en todo instante de 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.

1.3. Organización del documento

El documento registra un marco teórico amplio en el capitulo 2, el cual brinda información importante de las tecnologías existentes, ventajas y desventajas de unas y otras, las razones por las cuales se escogió la tecnología SPD (Suspended Particle Devices) para ejecutar el estudio así como muestra el estado del arte de los trabajos realizados en modelamiento y control. El capítulo 3 ilustra las

consideraciones de diseño y realización del prototipo construido para lograr los objetivos. Posteriormente el capítulo 4 es dedicado al modelamiento de la planta física construida, consideraciones teóricas, experimentación y validación de los resultados del modelo. El diseño de control es presentado en el capítulo 5 y todos sus resultados y cumplimiento de los objetivos principales. Por último las conclusiones de la investigación culminan éste documento.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Materiales Cromogénicos

Los materiales cromogénicos son compuestos, desarrollados por el hombre (Algunos usan elementos de la naturaleza), 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" [19], adicionalemente se reducen las ganancias de calor solar (producidas por la radiación infraroja) 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 [20]. Tales dispositivos también conocidos como "dispositivos ópticos conmutables" pueden ser empleados para ventanas en una variedad de aplicaciones donde se requiere de la modulación óptica y térmica ya que el propósito de estos materiales en el área arquitectural es controlar el flujo de luz y calor que atraviesa una ventana, de acuerdo al confort desde el punto de vista personal o dentro de un esquema de ahorro de energía [19].

Prácticamente todas las tecnologías de materiales que regulan alguna propiedad óptica visible por el hombre, se encuentra clasificados dentro de materiales cromogénicos. Sin embargo tales tecnologías suelen tener principios de funcionamiento distintos. De esta manera algunos funcionan de acuerdo a un movimiento de masa directo, y otros de acuerdo a un movimiento físico colectivo [18]. El primero se refiere a un movimiento localizado de iones y electrones en los que podrían clasificarse los materiales de la siguiente tabla:

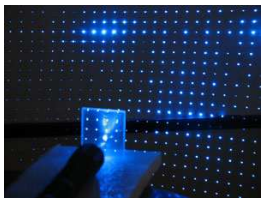
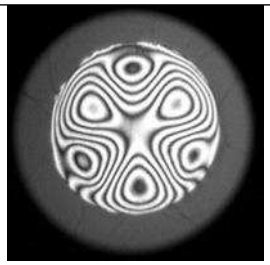
Tabla 2.1: Características de los materiales cromogénicos que se basan en un movimiento de masa discreta.

Tecnología cromogénica de movimiento de masa directo	**Imagen ejemplo**
Fotorefractivos: Son materiales con un índice de refracción que puede ser alterado con la presencia de luz láser. Algunas de sus aplicaciones son almacenamiento de datos de forma óptica, comunicaciones ópticas y conversión de longitudes de onda[1].La energía estimulante externa es la luz láser. Es un proceso no reversible.	
***Photochromics*:** Se ejecuta un cambio en su estructura química reflejado en un cambio de color en el material después de absorber luz ultravioleta UV, usualmente del sol o de otra fuente de luz UV. Es uno de los fenómenos mas antiguos en conmutación, existen registros desde 1880's [21]. La aplicación mas famosa de estos materiales son los lentes Transitions® ya muy conocidos en el mercado [2]. La energía estimulante externa es la luz UV. Es un proceso reversible.	
***Electrochromics EC*:** Cambia propiedades ópticas como la transmitancia y la composición espectral de la luz que atraviesa, en presencia de un potencial eléctrico. Tiene efecto de memoria de circuito abierto. Su aplicación más importante es en ventanas inteligentes. La energía estimulante externa es la electricidad. Es un proceso reversible.	
***Thermochromics*:** Utiliza la habilidad de ciertas sustancias de cambiar su color con el cambio de temperatura. Al igual que *photochromics*, los materiales termocrómicos han sido conocidos desde 1870's [21]. Es usado en almacenamiento de imágenes infrarrojas, displays de cristal liquido y productos para el hogar, entre otros (En la imagen vemos un anillo comúnmente conocido como "anillo del humor" es un ejemplo de *thermochromism*). La energía estimulante es el calor. Es un proceso reversible con histéresis.	
Fin de la Tabla	

El segundo corresponde a un movimiento físico de orientación de sus componentes y estarían clasificadas allí las siguientes tecnologías:

Tabla 2.2: Características de los materiales cromogénicos que se basan en un movimiento físico colectivo.

Tecnología cromogénica de movimiento físico colectivo	**Imagen ejemplo**
Cristal Líquido: El mecanismo de conmutación óptica en cristales líquidos es cambiar la orientación de las moléculas de cristal líquido ínter esparcidas entre dos electrodos conductores con la aplicación de un campo eléctrico. Su funcionamiento es ON-OFF. Su mayor aplicación esta en los acristalamientos. El tamaño más grande de una ventana inteligente que se ha logrado comercialmente es de tecnología cristal líquido [21]. La energía de estimulación es de carácter eléctrico. Es un proceso reversible.	
Partículas suspendidas SPD: Consiste en un material de 5 o mas capas donde la capa activa posee miles de partículas con forma de aguja suspendidas dentro de un gel encerrado entre dos electrodos conductores. Las partículas absorben luz cuando están ubicadas de forma aleatoria pero al aplicar un campo eléctrico, las partículas se alinean con el campo y dejan pasar más intensidad y composición espectral de la luz. Al igual que *electrochromics*, variando la intensidad del campo es posible regular de forma continua la transmitancia de luz visible y el coeficiente de ganancia solar, dentro de determinado rango. Los trabajos mas tempranos fueron hechos por Edwin Land de Polaroid desde 1934 [18]. La energía de estimulación es de electricidad y es un proceso 100 % reversible.	
Continúa siguiente página...	

... Viene de página anterior	
Rejillas de difracción ajustables: La rejilla incluye un sustrato y una estructura electro-óptica que lo cubre. La estructura electro-óptica debe incluir una guía de onda, definiendo un eje de propagación. Un electrodo es suministrado sobre cada lado de la estructura electro-óptica y paralelo al eje de propagación de tal forma que se genera un campo eléctrico en la estructura cuando se aplica un potencial a los electrodos. El campo eléctrico generado induce una rejilla de difracción en la guía de onda teniéndose un índice ajustable variando el campo. La energía de estimulación es de electricidad y es un proceso 100 % reversible.	
Membranas Deformables: Empleados en moduladores de luz, lentes o espejos ajustables. Utilizan el principio de Fuerza electrostática para deformar una membrana proporcionalmente al potencial aplicado. La energía de estimulación es electricidad y es un proceso 100 % reversible.	
Fin de la Tabla	

2.1.1. Cromogénicos activados eléctricamente

Como se observa en las tablas anteriores, los dispositivos cromogénicos se clasifican además por su forma de estimulación: eléctrica, lumínica, térmica, etc. En este trabajo son de interés los primeros, para poder utilizar el dispositivo cromogénico dentro de un sistema de control electrónico. Dentro de esta familia de dispositivos cromogénicos activados eléctricamente se encuentran comprendidos los *electrochromics*, los cristales líquidos dispersos y las partículas suspendidas. De las características más significativas de ésta familia es que necesitan dos capas de material conductor en el vidrio que trabajan como electrodos pero que deben ser transparentes y flexibles [3]. Ésta característica tecnológica es dominante en el costo del vidrio debido a que su fabricación debe dar como resultado una capa de muy baja resistividad independiente del tamaño, por ésta razón ha sido objeto de constante investigación en los últimos años. Sin embargo para las tecnologías que usan efecto de campo, la necesidad de electródos de muy baja resistividad es menor que para la tecnología *electrochromics* [21] ya que su principio de funcionamiento es puramente eléctrico como se expondrá mas adelante. Entre los materiales más

comunes para la fabricación de tales electródos transparentes están $In_2O_3 : Sn$ (También conocido como ITO [3]) SnO_2: F y $SnO : Sb$.

Ahora, otra subclasificación puede darse si se tiene en cuenta que dentro de los cromogénicos activados eléctricamente, algunos se pueden regular continuamente dentro de un rango de transmitancia, mientras que otros solo ofrecen una conmutación todo-nada. Las dos tecnologías que pertenecen a la primera de las dos calificaciones anteriores son: *Electrochromics EC* y partículas suspendidas SPD.

2.1.2. Dispositivos *electrochromics* EC

Un dispositivo *electrochromics* funciona con el principio de una celda electroquímica configurada no como una batería sino como una celda de electrólisis. Allí interactúan principalmente dos electródos transparentes separados por un conductor de iones conocido como electrolíto. En la mayoría de los casos se compone de 7 capas (Ver Figura 2.1): 2 paneles de vidrio o plástico, 2 capas conductoras transparentes (TC1 y TC2), 1 electródo *electrochromics*, 1 electródo opuesto al *electrochromic*, 1 capa conductora de iones (Electrolíto).

Una celda electrolítica consta de dos electródos (Para este caso, las capas TC1 y TC2), uno que actúa como ánodo y otro como cátodo. En diferencia a una batería, en la celda electrolítica, el ánodo es positivo y el cátodo es negativo, debido a la aplicación de una f.e.m eléctrica externa de mayor valor que la f.e.m de la propia celda. Tal voltaje externo induce procesos químicos en la celda. En el electródo que sirve de ánodo ocurre un desprendimiento que pasa a la solución o electrolíto en forma de iones. En el cátodo se presenta el fenómeno de deposición de los iones de la solución. El proceso en síntesis, consiste en el recubrimiento electrolítico a través de una solución, que contiene iones, cuya concentración se mantiene constante debido al desprendimiento de éstos mismos iones del otro electródo que sirve de ánodo. Este proceso electrolítico, convencionalmente usado para recubrir objetos de otros metales colocados como cátodos, es decir para procesos como el cobreado, plateado, cromado, etc., ha sido empleado para la invención de materiales *electrochromics*. En tal caso, cuando se aplica una fuente de voltaje de señal directa y su polo negativo es conectado al electródo *electrochromic*, el recubrimiento de iones se hace sobre dicho electródo, produciendo una reacción de oscurecimiento en él [4]. Ahora si la fuente de voltaje se invierte, conectando su polo negativo sobre el electródo contrario al *electrochromics*, también ocurre un recubrimiento sobre dicho electródo pero con la diferencia de que no ocurre ninguna reacción de carácter visible sobre tal elemento, por lo tanto no se produce oscurecimiento al conservar su carácter traslúcido original. Estos dos procesos son

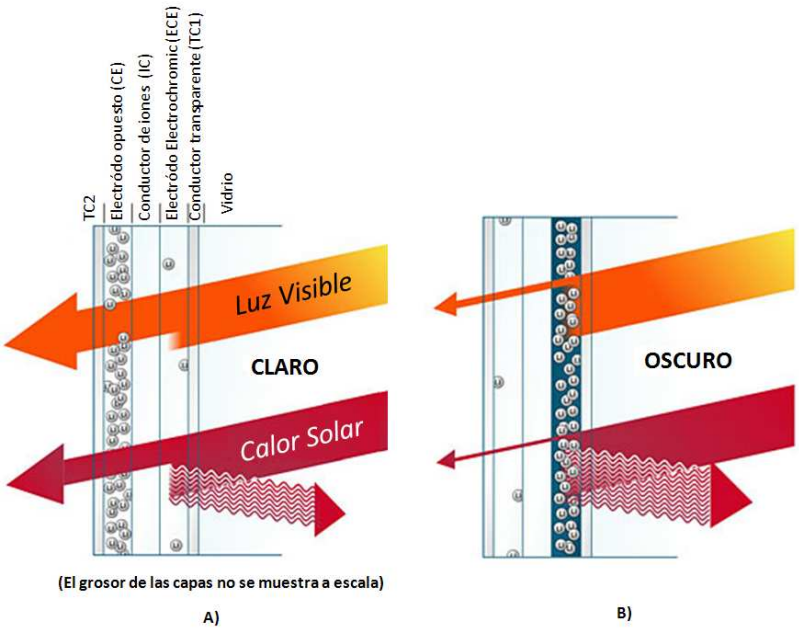


Figura 2.1: Funcionamiento de un dispositivo *eletrochromics*. A)Estado Claro B) Estado Oscuro. Adaptado de [9].

ilustrados claramente en la Figura 2.1.

Las mayores ventajas de los materiales *electrochromics* son: Solo requieren potencia durante la conmutación, tienen una memoria de largo tiempo (12 a 48 horas), requieren un voltaje pequeño de conmutación (1-5V), es posible fabriar grandes áreas [18].

2.1.3. Dispositivos de partículas suspendidas SPD

Un dispositivo SPD al igual que un EC, en la mayoría de los casos se compone de 7 capas (Ver Figura 2.2): 2 paneles de vidrio o plástico, 2 capas de material conductivo transparente (electródos 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 micropartículas suspendidas en un fluido orgánico o gel no conductivo). Las partículas son *electrophoretic particles* en formas de barra, 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

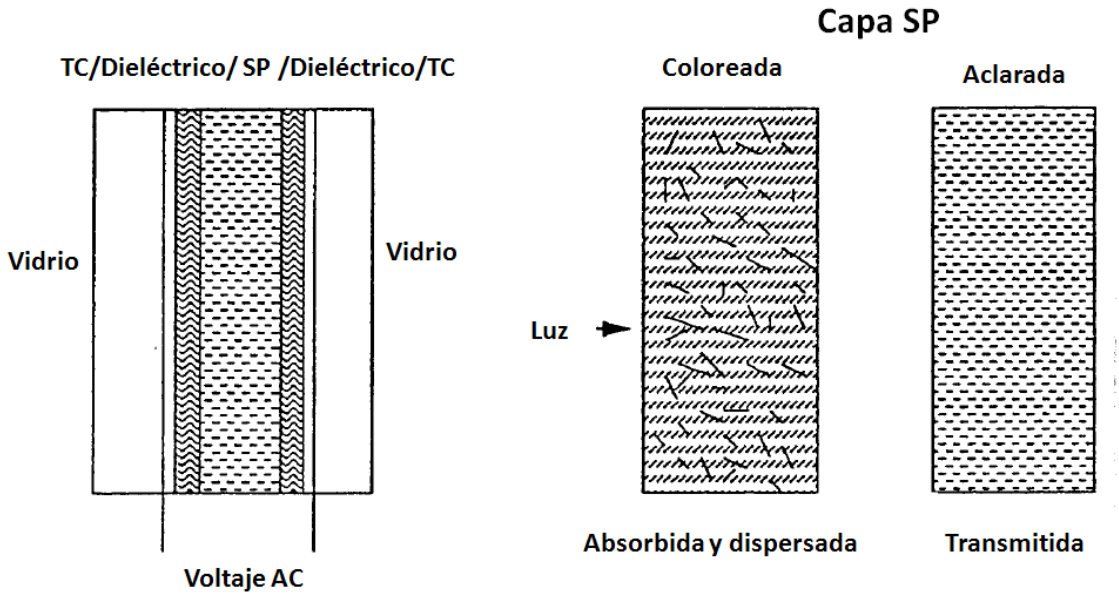


Figura 2.2: Esquema de la construcción de un acristalamiento de partículas suspendidas SPD. Adaptada de [21].

la influencia de un campo eléctrico $\vec{E}$. 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, permiten el paso de luz visible (Efecto de persiana Ver Figura 2.2).

2.1.4. Análisis comparativo entre las tecnologías EC y SPD.

Con el objetivo de visualizar las principales ventajas y desventajas de éstas dos tecnologías de interés, aptas para la regulación y el control de transmisión de luz día, se han registrado en la Tabla 2.3 las especificaciones comúnmente encontradas en productos comerciales.

Tabla 2.3: Tabla comparativa entre productos EC y SPD conseguidos comercialmente.

	EC:Electrochromics	**SPD: Suspended Particle Devices**
Principio de funcionamiento:	Electrólisis (Es una celda electrolítica transparente). Se usa la coloración de iones.	*Electrophoresis*. Se usa la orientación de nanopartículas de forma alargada.
Tipo de Voltaje	DC	AC
Rangos de voltaje	1 - 5 Vdc	0 - 110 Vrms
Estado de correspondencia con el voltaje:	-5Vdc = Claro; o viceversa dependiendo de polaridad 5Vdc = Oscuro	0Vrms = Oscuro 110Vrms = Claro
Características de alimentación	Solo requiere potencia en la transición de un estado a otro. Memoria de (12 a 48h).	Requiere potencia en la transición y para mantener el estado (En este ultimo caso el valor de potencia es mucho menor que el de transición).
Potencia de transición	2.8W por m2. (Producto comercial de Sage Electrochromics)	5W por m2. (Producto comercial de SPD systems, INC).
Corriente de transición	Por el orden de los 500mA	Por el orden de los 40mA
Potencia estado estable	1W por m2. (Producto comercial de Sage Electrochromics)	0.5W por m2. (Producto comercial de SPD systems, INC).
Corriente estado estable	Por el orden de los 200mA	Por el orden de los 4mA
Energía promedio consumida 1 día (Periodo de 10 horas)	Para un panel de 1m2: 10Wh (Una lámpara de 60W consumiría 600Wh, se compararía con un vidrio de 60m2)	Para un panel de 1m2: 5Wh (Una lámpara de 60W consumiría 600Wh, se compararía con un vidrio de 120m2)

Continúa siguiente página...

... Viene de página anterior		
Tiempo de subida (claro a oscuro)	5 10 min. a temperaturas mayores de 10^o C. 30-40 min. a temperaturas menores	0.5s aprox
Tiempo de subida (oscuro a claro)	5 10 min. a temperaturas mayores de 10^o C. 30-40 min. a temperaturas menores	1s aprox
Rango de Transmitancia	Tv= 3.5 - 62 %	Tv= 4 - 50 %
Rango de SHGC (Solar Heat gain coefficient)	SHGC = 0.09 0.48	SHGC = 0.2 0.99
Fin de la Tabla		

A pesar de que teóricamente, un dispositivo EC no consume energía en estado estable debido a su capacidad de memorizar su estado por un tiempo apreciable, los productos comerciales muestran un consumo mínimo, el cual es incluso mayor al de un dispositivo SPD, lo que hace interesante a un dispositivo SPD en cuanto a consumo energético a pesar de no tener efecto de memoria. Por otro lado la ventaja mas apreciable de un dispositivo SPD sobre un EC desde el punto de vista de control, son sus tiempos de respuesta. Estos son grandiosamente superiores estando en el orden de segundos mientras los EC por el orden de varios minutos. Esto hace superiores los SPD para efectos de control de luz día.

2.1.5. Beneficios energéticos en las construcciones por el uso de tecnologías cromogénicas en fachadas.

Además de la elegante virtud de brindar a la fachada una vistosa característica de adaptabilidad frente a las condiciones ambientales, la principal razón para emplear este tipo de alternativas es debido a que junto con un sistema electrónico óptimo, pueden llegar a ser lo mas parecido a una "ventana inteligente" en el sentido de que ellas tienen la habilidad de cambiar sus propiedades ópticas/solares usando variables de control tales como la radiación solar incidente o transmitida, el nivel de luz día, la temperatura ambiente del aire, la carga térmica del espacio, etc. Por tanto, contrario a los vidrios convencionales, ellos proveen una oportunidad de optimizar la energía y el confort, cambiar dinámicamente y encontrar un cambio funcional en los requerimientos de los edificios [33].

Debido a razones de alcance de éste proyecto, no fue medido el impacto del uso de estas tecnologías frente a la demanda eléctrica, por tanto la actual sección en su totalidad se basa en la información brindada en trabajos reportados en la bibliografía principalmente por Selkowitz [29], Sullivan [31], [32], [33], Klems [14]. A continuación se ilustran algunas cifras, resultados y observaciones producto de dichos estudios basados tanto en simulaciones como en trabajos experimentales en su mayoría ejecutados en la Universidad de Berkeley principal entusiasta de la tecnología EC *Electrochromics*. Se estudia el impacto de las ventanas EC en la energía por refrigeración o calefacción (según sea el caso) por iluminación, la energía eléctrica total gastada y el pico de demanda como una función del tipo de ventana y su tamaño. En lugares donde se usa principalmente la refrigeración, las ventanas activas pueden reducir cargas de refrigeración al suministrar un bajo coeficiente de calor solar SHGC. Ellas también pueden reducir cargas de iluminación manteniendo una transmitancia visible Tv alta para alcanzar unas buenas características de luz día pero suministrando control de deslumbramiento cuando se haga necesario. En lugares donde domina la calefacción ellas también pueden suministrar una rebaja en las cargas de calefacción al dejar pasar las ganancias solares que aún cuando son bajas, aportan en la reducción de la carga térmica total.

Los resultados y observaciones presentados en tales estudios, los cuales han mostrado con algunas cifras las ventajas de usar estas tecnologías también brindan recomendaciones en la selección de un determinado material de acuerdo a los requerimientos específicos de la construcción y a las características climáticas de la zona donde va a utilizarse la tecnología. En primer lugar, tenemos que los sistemas de ventanas empleados pueden ser de varios tipos. Puede emplearse ventanas EC únicamente o combinadas con otros vidrios como un vidrio de baja emisividad conocido como *Low-E* o con un vidrio de espectro selectivo. Ésta ultima combinación permite una caracterísitica interesante debido a que el vidrio puede tener un alto nivel de transmitancia de luz visible Tv en su estado claro pero con un bajo nivel de coeficiente de ganancia de calor solar SHGC. Esto permitiría dejar pasar un porcentaje de luz considerable en su estado claro junto con un bajo porcentaje de calor solar hacia el interior de la construcción, en pocas palabras, pasa la luz y no el calor y como observación anticipada se podría decir que tal característica es adecuada para aplicaciones en clima cálido ya que ayudaría a reducir cargas de refrigeración al mismo tiempo de reducir cargas de iluminación. Debe también mencionarse, que las propiedades solares (SHGC: Coeficiente de ganancia de calor solar) y ópticas (Tv: Transmitancia de luz visible) de cada sistema de ventana en particular es definida por cada fabricante y no es posible en este caso generalizar el comportamiento de las ventanas dinámicas. Respecto a éstas dos características

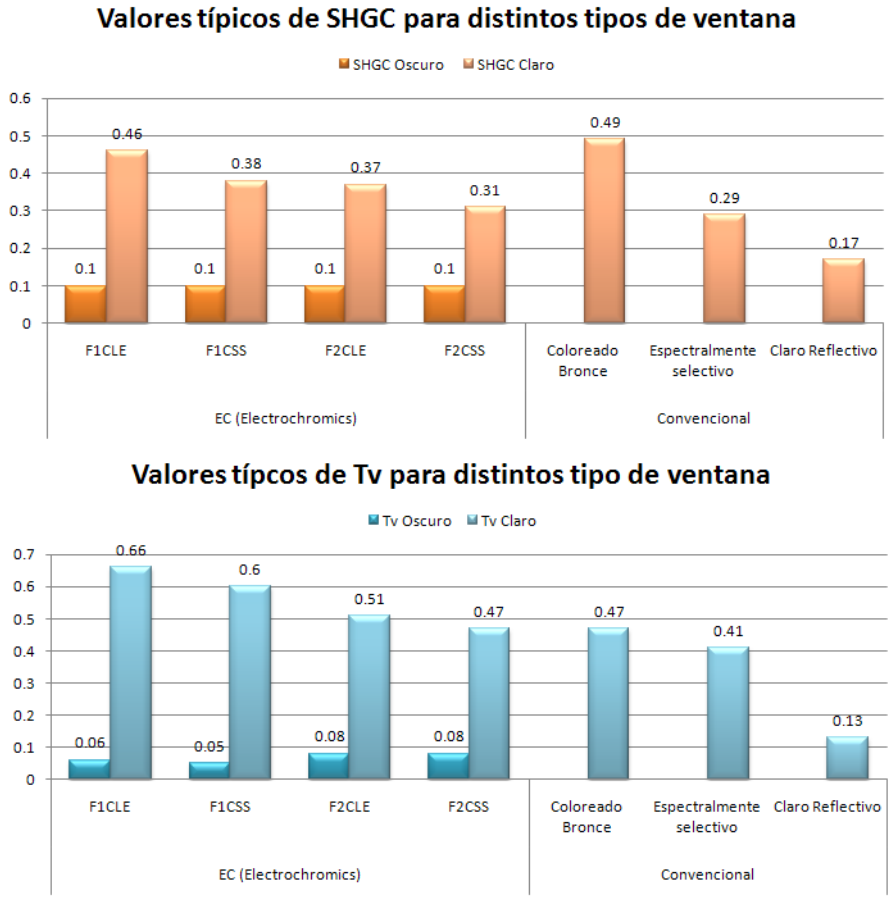


Figura 2.3: Valores de Tv y SHGC para distintos tipos de ventana tanto activas *EC Electrochromics* como convencionales. Adaptado de [33].

se podría decir que un valor óptimo de SHGC en determinado instante se relaciona más directamente con el ahorro que se puede lograr por energía de refrigeración, ventilación o calefacción según sea el caso, mientras que un valor óptimo de Tv determina el ahorro que se puede conseguir en lo referente a energía por cargas de iluminación. En la figura 2.3 se ilustran valores típicos de siete diferentes tipos de ventana donde los cuatro primeros corresponden a ventanas de película activa y los demás a ventanas convencionales.

- **F1CLE:** EC combinado con vidrio de baja emisividad *Low-E* por el fabricante 1. En estado aclarado tiene un alto nivel de SHGC y de Tv.
- **F1CSS:** EC combinado con vidrio de espectro selectivo por el fabricante 1.

Tiene un mas bajo nivel de SHGC y de Tv que el anterior.

- **F2CLE:** EC combinado con vidrio de baja emisividad *Low-E* por el fabricante 2. Tiene mas bajo nivel de SHGC y de Tv que los dos vidrios del fabricante 1.
- **F2CSS:** EC combinado con vidrio de espectro selectivo por el fabricante 2. Entre los sistemas de ventana activa mostradas en el gráfico, es el de valor de SHGC y Tv mas bajo.
- **Color bronce:** Vidrio de color bronce. Tiene un alto nivel de SHGC y un nivel medio de transmitancia Tv.
- **Espectro selectivo:** Tiene un bajo nivel de SHGC con un nivel medio de Tv.
- **Claro reflectivo:** Este es un vidrio oscuro de bajo nivel de SHGC y de Tv.

Climas donde predomina la refrigeración.

Como se mencionó anteriormente, un factor determinante en la energía empleada es el tamaño de las ventanas. Los estudios muestran generalmente que para climas cálidos, la energía gastada por refrigeración se incrementa con el tamaño de la ventana o mas exactamente con la relación ventana-pared RVP (Ésta relación toma un valor de 0 a 1 de acuerdo al porcentaje de área que ocupe la ventana respecto a el área total de la fachada). Este comportamiento obedece a que entre más grande sea la ventana, mayor ganancia de calor solar pasa a través de ella, por tanto al ser un clima cálido se necesitaría mas energía de refrigeración para obtener confort. Por otra parte, en el caso de consumo de energía por iluminación, ésta disminuye a medida que la ventana sea más grande hasta llegar a saturar el nivel de iluminación, y después de dicho umbral, el hecho de aumentar el tamaño de la ventana, no refleja más ahorro que el conseguido en tal umbral. Tales comportamientos típicos son ilustrados en la figura 2.4.

Ahora con el objeto de comparar las diferentes tipos de ventana, se tiene que las ventanas con película activa obedeciendo a determinada estrategia, varían sus propiedades ópticas y solares dentro de un rango como se observa en la figura 2.3 , mientras que las convencionales no poseen tal característica de variación. La estrategia para variar las propiedades de las ventanas de película activa es una estrategia de control de luz día, la cual consiste en modular lineal y continuamente la transmitancia de luz visible entre los estados claro y oscuro en orden de suministrar un nivel de iluminación determinado típicamente entre los 500 y 600

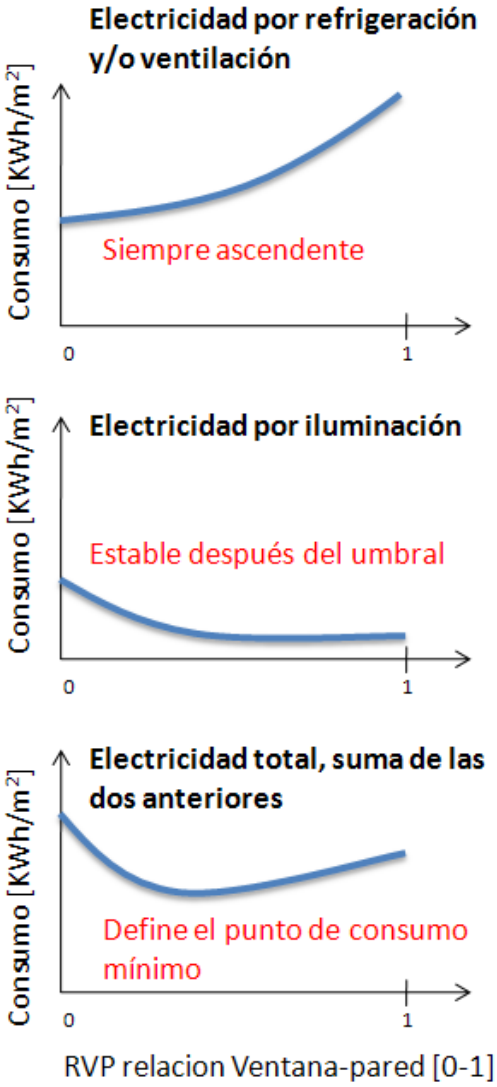


Figura 2.4: Comportamiento típico del consumo eléctrico en función de la relación ventana-pared.

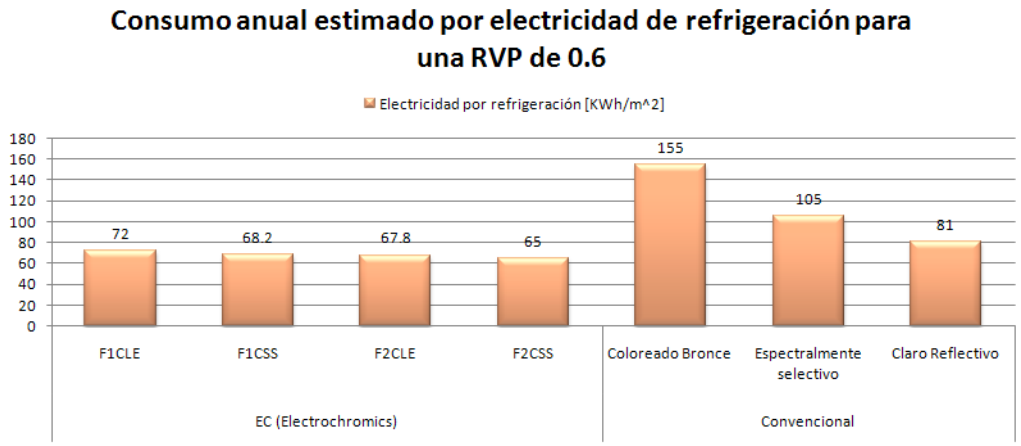


Figura 2.5: Consumo anual estimado de electricidad por refrigeración para diferentes tipos de ventanas con relación de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33].

luxes recomendado para trabajo de oficina, en un punto determinado dentro de la zona en estudio. Por tanto para poder lograr tal nivel de iluminación independiente del tipo y hora del día, se incluye un sistema de dimerización eléctrica para las lámparas interiores, con el objetivo de suministrar lineal y continuamente el nivel de iluminación restante en el caso de luz día insuficiente. De acuerdo a dicha estrategia, el desempeño de la energía es estudiado y comparado entre los diferentes sistemas. Algunos resultados numéricos del consumo de electricidad anual por refrigeración obtenidos según Sullivan [33], para una relación ventana pared de 0.6 son mostrados en la figura 2.5.

Es posible observar que el mejor resultado se obtiene con el vidrio EC de espectro selectivo del fabricante 2 F2CSS. Esto se debe a su menor nivel de transmitancia en el estado claro. El ahorro logrado frente al mejor de los vidrios convencionales el cual es el claro reflectivo (es un vidrio oscurecido) es del 20.8 %, mientras que el ahorro frente al coloreado bronce es del 58 %. Por tanto, en un clima cálido el ahorro en electricidad de refrigeración frente a vidrios convencionales estaría en el rango del 20.8 % al 58 %. Nótese también que la escogencia entre los EC conlleva en sí un ahorro significativo, el EC de espectro selectivo del fabricante 2 presenta un ahorro de aproximadamente el 9 % respecto al EC de baja emisividad del fabricante 1, esto se debe a que la diferencia entre los valores maximos de SHGC entre fabricantes es significativa y para éste caso de clima cálido favorece al que tiene menor valor máximo de SHGC.

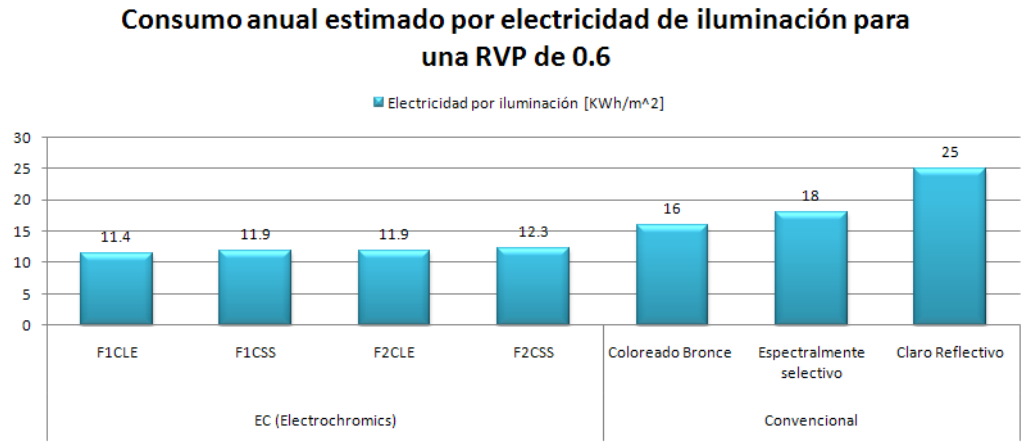


Figura 2.6: Consumo anual estimado de electricidad por iluminación para diferentes tipos de ventanas con relacion de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33].

Un estudio similar se hace para la iluminación. Aunque el consumo es una función de la relación ventana-pared de la fachada, debido a que el nivel de iluminación interno está predefinido por los estándares, llega un punto donde hacer más grande la ventana no produce ningún ahorro por iluminación y puede llegar a ser molesto cuando permite el deslumbramiento. En la figura 2.6 muestra como en el caso de iluminación brinda un mayor resultado aquel EC con un valor maximo de Tv mayor, en este caso corresponde al vidrio EC combinado con el de baja emisividad del fabricante 1 el cual tiene un valor de Tv en el estado claro de 0,47. Es lógico que en el caso de iluminación entre mayor sea Tv mas luz natural aprovecha por tanto menos energía eléctrica consume, por tanto esta es la razón de dicho comportamiento.

El ahorro logrado frente al mejor de los vidrios convencionales el cual es el coloreado bronce (es el mas claro de los convencionales) es del 28.7 %, mientras que el ahorro frente al claro reflectivo es del 54.4 %. En conlusión en un clima cálido el ahorro por cargas de iluminación frente a vidrios convencionales estaría en el rango del 28.7 % al 54.4 %. Nótese también que la escogencia del EC conlleva en sí un ahorro significativo, el EC de baja emisividad del fabricante 1 presenta un ahorro de aproximadamente el 7.3 % respecto al EC de espectro selectivo del fabricante 2, esto se debe a que la diferencia entre los valores maximos de Tv entre fabricantes es significativa y para éste caso de clima cálido favorece al que tiene mayor valor máximo de Tv. Esta situación es inversa a la encontrada en el analisis de

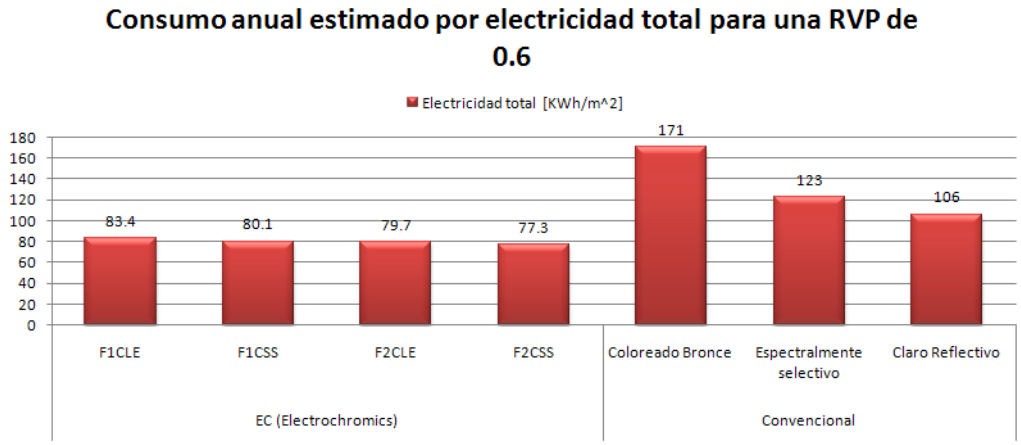


Figura 2.7: Consumo anual estimado de electricidad total para diferentes tipos de ventanas con relacion de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33].

cargas de refrigeración, sin embargo, hay que notar que el mayor ahorro obtenido en KWh/m$\hat{2}$ por cargas de refrigeración es del orden de 90KWh/m$\hat{2}$ mientras que el obtenido por cargas de iluminación es de 13.6KWh/m$\hat{2}$ por lo que seria mas conveniente elegir la configuración favorable a las cargas de refrigeración ya que se obtiene mayor ganancia. En la figura 2.7 se ilustra la suma de los dos consumos de electricidad o la electricidad total estimada.

Finalmente, para éste experimento, el sistema óptimo de ventana en cuanto a consumo eléctrico en clima cálido fue el EC de espectro selectivo del fabricante 2. Esta tecnología permite un ahorro energético del 27 % al 54.8 % frente a sistemas convencionales de ventana.

Climas donde predomina la calefacción.

La experiencia de los trabajos anteriores dictan que la estrategia de control por luz día en estos climas, energéticamente no es la más efectiva. Por tanto, otro tipo de pruebas se han realizado usando como estrategia mantener el vidrio en el estado claro al menos durante todo el tiempo que se use calefacción para tratar de aprovechar al máximo la ganancia de calor solar por escasa que sea. Esta última estrategia hace que el dispositivo dinámico se comporte estáticamente por tanto tiene como inconveniente que puede llegar a presentar problemas de deslumbramiento al no tener control sobre el vidrio en momentos que predomina

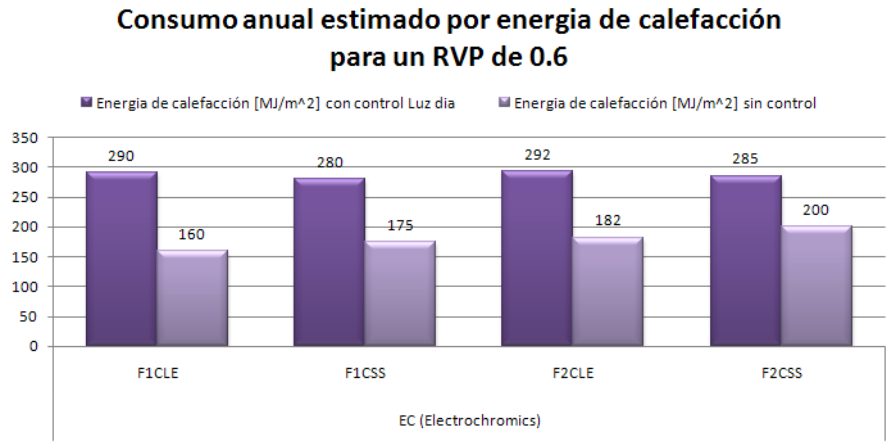


Figura 2.8: Consumo anual estimado de energía de calefacción para diferentes tipos de ventanas EC con relación de área de 60 % de fachada. Adaptado de [33].

la calefacción. Sin embargo dependiendo del caso se podría elegir entre una u otra estrategia. En la figura 2.8 se ilustra tal comparación entre las dos estrategias de control para los dispositivos EC.

No existe mucha diferencia entre las distintas EC cuando son controladas, sin embargo, cuando no son controladas, las EC con vidrio de baja emisividad *Low-E* tienen un consumo mucho menor que las de espectro selectivo. Esto se debe a que las *Low-E* tienen un SHGC máximo mayor que las de espectro selectivo.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Sistemas de Control de luz día

La luz es una necesidad fundamental para el hombre y demás formas de vida. De acuerdo a la evolución, el desarrollo de órganos de percepción visual del hombre estuvieron basados en la luz día. Su intensidad, dirección, distribución espacial y temporal, la creación de sombras y la composición de su espectro tienen una influencia directa sobre la fisiología y psicología humana, y debe considerarse en la realización de un ambiente visualmente confortable. Por tanto la luz debe considerarse como una forma de energía renovable para sustituir la luz artificial y mejorar la calidad de vida en ambientes de trabajo. Los sistemas y estrategias de control de luz día resultan de gran importancia para países caracterizados por climas cálidos y altas radiaciones solares, con un gran potencial en el uso de luz

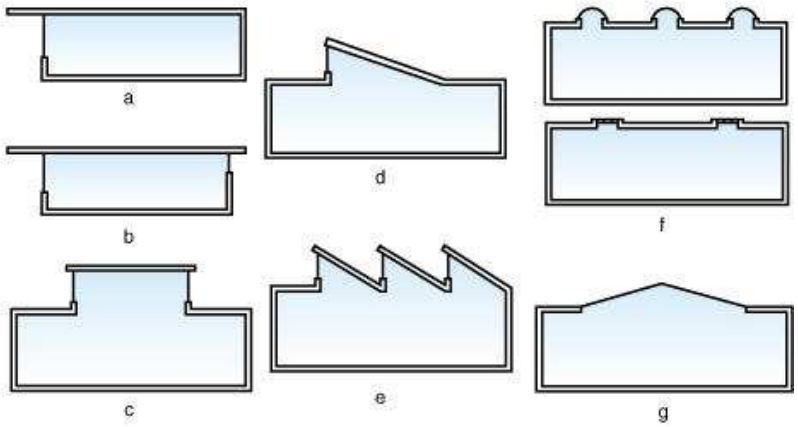


Figura 2.9: a. Iluminación unilateral b. Iluminación bilateral c.Iluminación por techo d. Iluminación *Clerestory* e. Iluminación diente de sierra f. Iluminación claraboya g. Atrio. [27].

natural para controlar el ambiente visual y térmico [7].

Existen varios procesos físicos que pueden emplearse para el control y modificación de la luz día incidente, energía solar y el deslumbramiento [19]. Los sistemas de luz día se componen principalmente por dos partes: La fenestración o disposición de las ventanas en la construcción, y los materiales y elementos de control empleados [27]. En la Figura 2.9 se ilustra la primera.

Por otra parte, una gran variedad de tipos de materiales son usados en sistemas de luz día. Entre éstos se encuentran: Los materiales transparentes (alta y baja transmitancia), de dependencia angular de la transmitancia, los acristalamientos activos, los materiales traslúcidos difusos, materiales de alta reflectancia - baja transmitancia, los materiales de transmisión direccional, los materiales de transmitancia espectralmente selectivos, entre otros. Con el objetivo de tener una referencia con los materiales pasivos, la Tabla 2.4 muestra datos de transmitancia de varios de dichos materiales.

Sin embargo en este trabajo interesa la categoría de tecnologías de ventana de material activo, específicamente las activadas eléctricamente. En la sección 2.1 se han ilustrado una gran parte de los materiales desarrollados con éste propósito. No obstante, se han estudiado los impactos que tienen otras tecnologías con buenos

[1]Incluye vidrio simple, unidades de doble vidrio, y ensambles laminados. Consulte al fabricante del material para valores específicos.

Tabla 2.4: Valores de transmitancia para materiales de vidrio y plástico empleados en ventanas. Adaptada de [27].

Material	Transmitancia aproximada [%]
Vidrio Pulido	80-90
Hoja de vidrio	85-91
Lámina de vidrio absorbente de calor	70-80
Hoja de vidrio absorbente de calor	70-85
Lámina pulida polarizada	40-50
Vidrio figurado	70-90
Bloque de vidrio	60-80
Hoja de plástico clara	80-92
Hoja de plástico teñida	42-90
Plástico estampado sin color	80-90
Plástico blanco traslúcido	10-80
Plástico reforzado con fibra de vidrio	5-80
Paneles sandwich traslúcidos	2-67
Vidrio luces claras doble vidrio	77
Teñido + claro	37-45
Vidrio reflectivo [1]	5-60

resultados, como los materiales activados por temperatura en [28].

Un trabajo muy importante con experimentación bajo condiciones reales, desarrollado por Lee en [22], [23]. La Universidad de Berkeley ha enfocado una investigación ademas del diseño y fabricación de dispositivos EC, hacia el estudio de optimización de sistemas que combinan luz día con luz natural. Una instalación para probar sistemas de ventana fue construida en LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratories*), en Berkeley en verano del 2003. La instalación fue diseñada para evaluar entre varias fachadas la diferencia térmica, de luz día, y el desempeño de un sistema de control. La instalación consiste de 3 habitaciones idénticas construidas con iguales materiales para imitar un ambiente de oficina convencional. En la Figura 2.10 puede observarse una concepción del sistema desarrollado para cada habitación. Básicamente consiste de un controlador alpha para cada ventana quien se encarga de garantizar el nivel de transmitancia deseado para cada ventana de acuerdo a la decisión tomada por un controlador maestro basado en PC desarrollado con Labview, quien a su vez toma lecturas de iluminación exterior e interior y gradúa tanto a las ventanas como a la luz artificial a través de lámparas fluorescentes dimerizables.

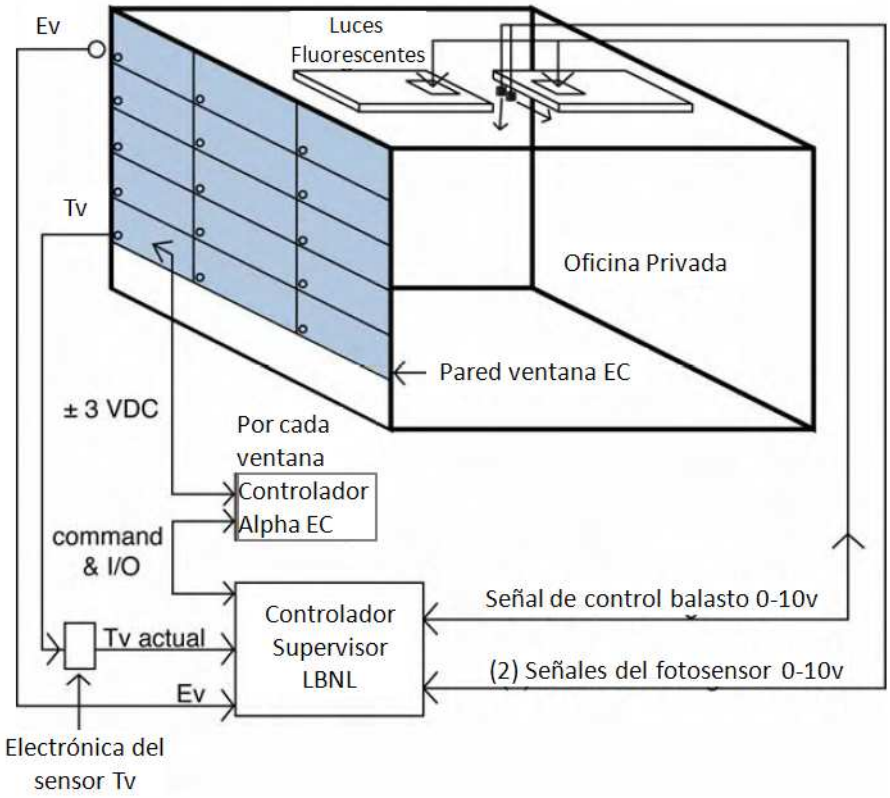


Figura 2.10: Diagrama de un sistema de control de luz día con una ventana EC integrada. Adaptada de [22]

.

Otros trabajos han sido importantes en el ámbito puramente computacional y se han concentrado en modelar sistemas de ventana [36] u optimizar los algoritmos de control de variables hidrotérmicas y de iluminación en condiciones reales en ambientes de edificios mediante simulación. Kristl [17] utiliza un sistema de control difuso para el posicionamiento correcto de los dispositivos de sombra incluyendo las ventanas, de acuerdo a condiciones interiores de confort.

2.2.2. Modelamiento de un dispositivo SPD

El modelo eléctrico más simple de un dispositivo SPD es el de un circuito RC. Una resistencia relacionada con los electródos y los cables, y un condensador formado por las dos capas de material conductivo transparente y el dieléctrico depositado en el medio como se ilustra en la figura 2.11.

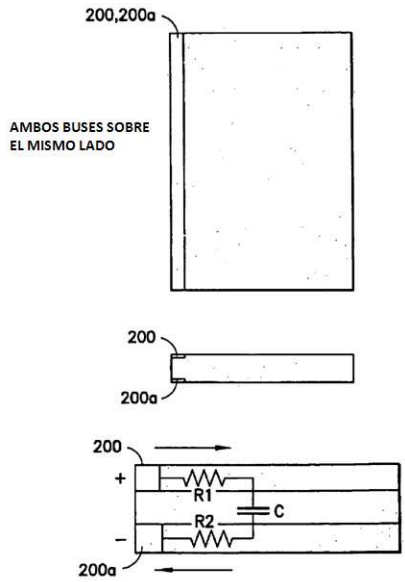


Figura 2.11: Circuito equivalente RC de una carga SPD con buses conductivos ubicados al mismo costado. Adaptada de [25].

Respecto a la respuesta en el tiempo de la transmitancia frente a un voltaje aplicado, se estima sea similar al voltaje en el condensador, es decir como una respuesta de primer orden. Sin embargo, un modelamiento lineal de este tipo solo seria válido en una región debido a que se sabe que el valor de estado estable de la transmitancia frente al voltaje aplicado es una función no lineal según Malvino [25], tal como se ilustra en la Figura 2.12. Allí en la figura b) se observa como el incremento es menor en los voltajes mas bajos y mas altos que en una región central la cual podría considerarse casi lineal.

Por otra parte, otro modelamiento eléctrico más complejo que el circuito RC fue estudiado por Vergaz [35] un dispositivo SPD de la compañía CRICURSA (Cristales Curvados S.A - España). El modelamiento eléctrico del dispositivo estuvo basado principalmente en el análisis de impedancia usando Espectroscopia. Tal método experimental consiste en excitar el dispositivo con un amplia gama de frecuencias, y registrar su impedancia. Los resultados se ilustran en el diagrama de nyquist de la Figura 2.13.

Luego de ejecutar las mediciones de impedancia experimentales, se buscó una representación eléctrica que correspondiera con las medidas de impedancia. Un acercamiento no lineal fue necesario para poder describir el comportamiento a

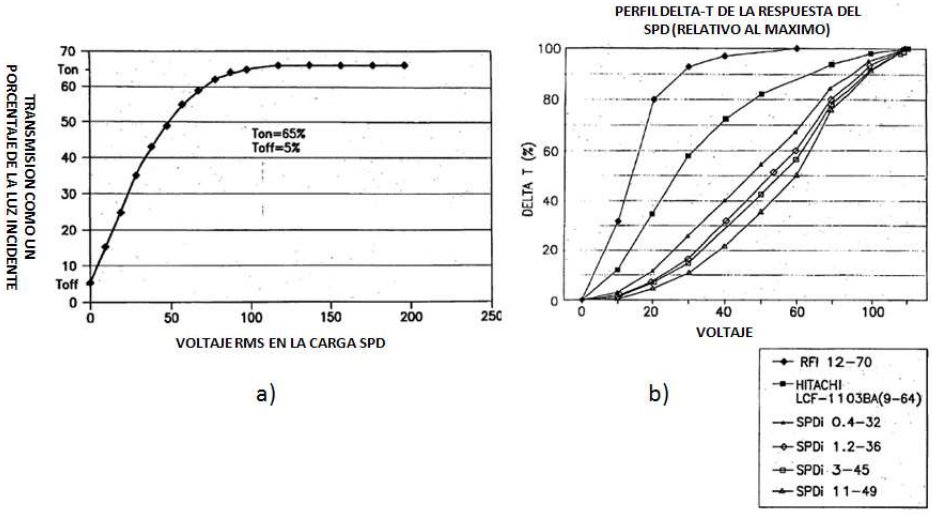


Figura 2.12: a) Diagrama de la transmisión de luz a través de una carga SPD típica contra el voltaje AC aplicado. b) Diagrama de la transmisión de luz a través de distintas cargas SPD comerciales contra el voltaje AC aplicado. Adaptada de [25]

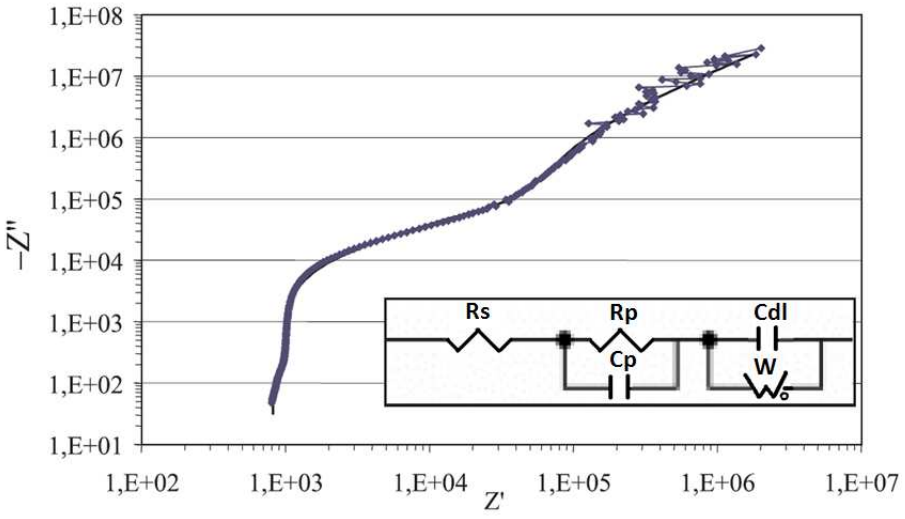


Figura 2.13: Modelo experimental de impedancia. Adaptada de [35]

bajas frecuencias de acuerdo a los procesos físicos que tienen lugar en el sistema. Existen modelos de electródos empleados en electromedicina, donde se utiliza un concepto denominado Impedancia Warbug. Este elemento surge físicamente de los limites del transporte de masa de iones en la solución. La tasa de reacción en los electródos se asume que es muy rápida, dejando el transporte de masa como un factor limitante. Debido a que hay una capa entre el electródo y el fluido que evita la convección del electródo con iones, haciendo la difusión como el método mas relevante de transporte de masa. Esta impedancia ha sido la mejor forma de representar los procesos de difusión, el cual se produce en el efecto *electrophoretic* en el cual está basado el funcionamiento de las películas SPD. Esta impedancia puede tener dos tendencias: Si la parte imaginaria de Z es grande y mayor, es como un circuito abierto, si la parte imaginaria de Z es pequeña y menor, seria como un corto circuito. La ecuación que describe esta impedancia es:

$$W_0 = R\frac{coth(T\omega j)}{(T\omega j)^P} \tag{2.1}$$

Donde R es la resistencia, T es la constante de tiempo relacionada con el proceso de difusión, y P es el exponente para describir el carácter capacitivo de la impedancia. En la Figura 2.13. se observa de color azul los datos de las lecturas experimentales, mientras que una linea de tendencia de color negro, la cual representa el modelo obtenido se asimila perfectamente a los datos experimentales. Finalmente el modelo eléctrico equivalente del dispositivo SPD estudiado por Vergaz [35] se ilustra en la figura 2.14.

2.2.3. Control de un dispositivo SPD

La literatura de corte académico encontrada frente al tema específico de control de un SPD no es abundante. En el trabajo de Vergaz [35] se brindan algunos resultados del control ilustrados en la Figura 2.15. Malvino en [25], [26] describe estrategias de control con triacs, la transmitancia del vidrio es regulada en unos cuantos intervalos discretos. Thomas [11] presenta un desarrollo eletrónico ajustable para una válvula de luz genérica. Análogamente trabajos con tecnología EC han sido presentados por Krc [15], Karlsson [12], Lee [22]. Un regulador análogo de tres estados de bajo precio es ilustrado en [15], aunque la variable sensada no es la transmitancia sino únicamente la iluminancia en uno de los lados del vidrio, de allí su limitación a ser de 3 estados. Lee [22] ilustra los resultados del controlador alpha mencionado en la sección 2.2.1 con la necesidad de corregir el error de estado estable el cual no favorece la optimización deseada por el controlador maestro. Con excepción de éste último trabajo un común denominador en los trabajos realizados son controles de lazo abierto. Por tanto es notable la necesidad de un

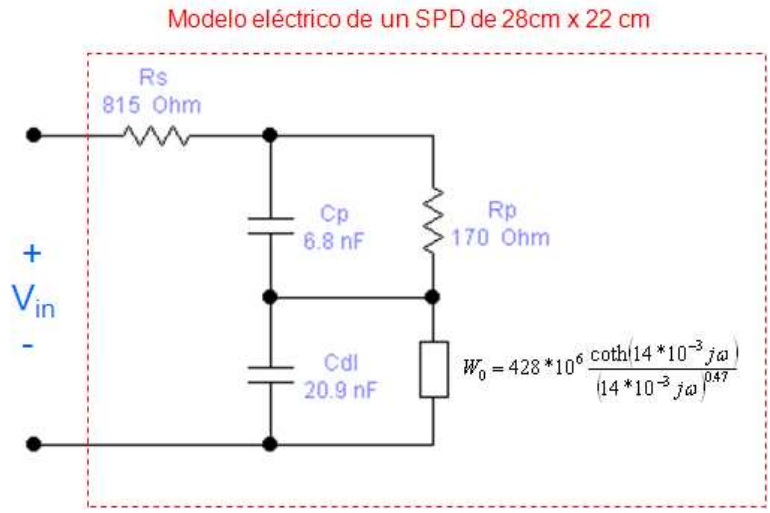


Figura 2.14: Modelo eléctrico equivalente de un dispositivo SPD (28x22cm) estudiado en [35]

.

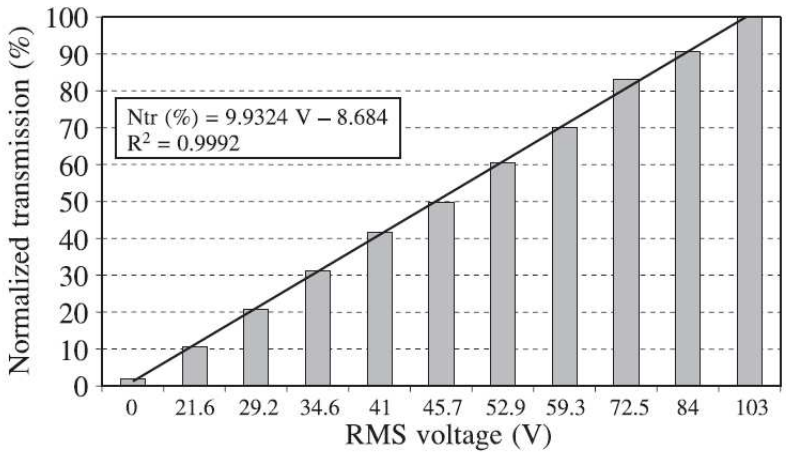


Figura 2.15: Comportamiento lineal de los niveles de transmitancia garantizados por el dispositivo de control, [35]

.

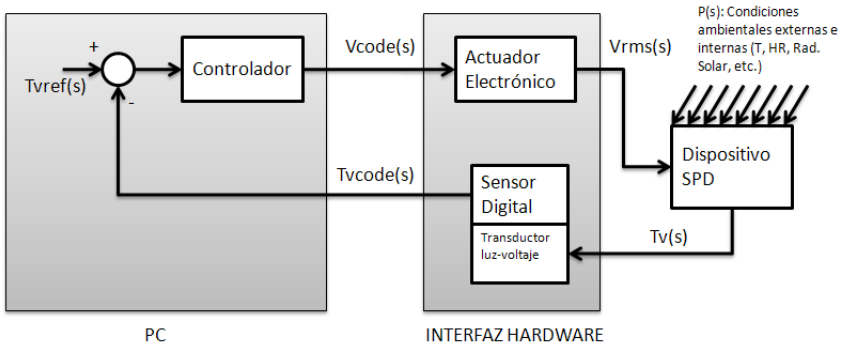
trabajo profundo frente al tema de control el cual es uno de los objetivos de este trabajo.

Capítulo 3

Diseño del prototipo - Hardware y Software

Para realizar el estudio de una ventana de tecnología SPD, se hizo necesaria el diseño y construcción de un prototipo a escala que permitiera ejecutar las pruebas necesarias para lograr los objetivos propuestos. En primer lugar, se definió una estructura del sistema ilustrada en la Figura 3.1, de acuerdo al análisis del conocimiento previo de las variables que intervienen.

Se tiene entonces que la tecnología SPD a emplearse actúa sobre el valor promedio de una señal de voltaje alterno que puede variar entre los 0 y 115 V_{rms}. Dicha señal es definida como la variable manipulada. Por otra parte se esperaría que las condiciones ambientales alteran de alguna forma el comportamiento del material, por tanto variables tales como las temperaturas externa e interna, Humedad Relativa y radiación solar son variables de entrada medibles pero son definidas como perturbaciones al no poder ser manipuladas. La variable de salida es la transmitancia de luz visible T_v, la cual representa el porcentaje de luz exterior que el material deja pasar hacia el interior. Cuando su valor es del 100 % significa que el material es totalmente transparente y permite el paso total de la luz visible y cuando su valor es del 0 % significa que el material se ha oscurecido y ha bloqueado completamente el paso. Este valor se mide entre los bordes exterior e interior del vidrio para evitar la dispersion de la luz en el espacio y de esta manera garantizar que la medición corresponde al nivel de transparencia del material. En la realidad, ninguno de los materiales cromogénicos usados en ventanas, posee un rango del 0 al 100 % de transmitancia, un rango típico será del 5 al 65 %.



Tvref: Referencia deseada de transmitancia de luz visible. [0-100 %]
Controlador: Controlador digital basado en software.
Vcode: Comando digital correspondiente al voltaje deseado en el SPD.
Actuador Electrónico: Interfaz de hardware, convierte el comando Vcode en un voltaje Vrms correspondiente.
Vrms: Voltaje rms aplicado al dispositivo SPD. [0-115Vrms]
P: Perturbaciones externas como condiciones ambientales a un lado y otro de la ventana, Temperatura, Humedad Relativa y Radiación solar.
Dispositivo SPD: Vidrio de tecnología SPD de 30x30cm.
Tv: Transmitancia de luz visible del dispositivo SPD. [0-1]
Transductor Luz-voltaje: Convierte el porcentaje de luz que atraviesa el vidrio en un voltaje proporcional.
Sensor Digital: Interfaz de hardware, convierte el voltaje en un código digital Tvcode y se comunica con el PC.
Tvcode: Comando digital correspondiente al valor de transmitancia.

Figura 3.1: Concepción previa del sistema.

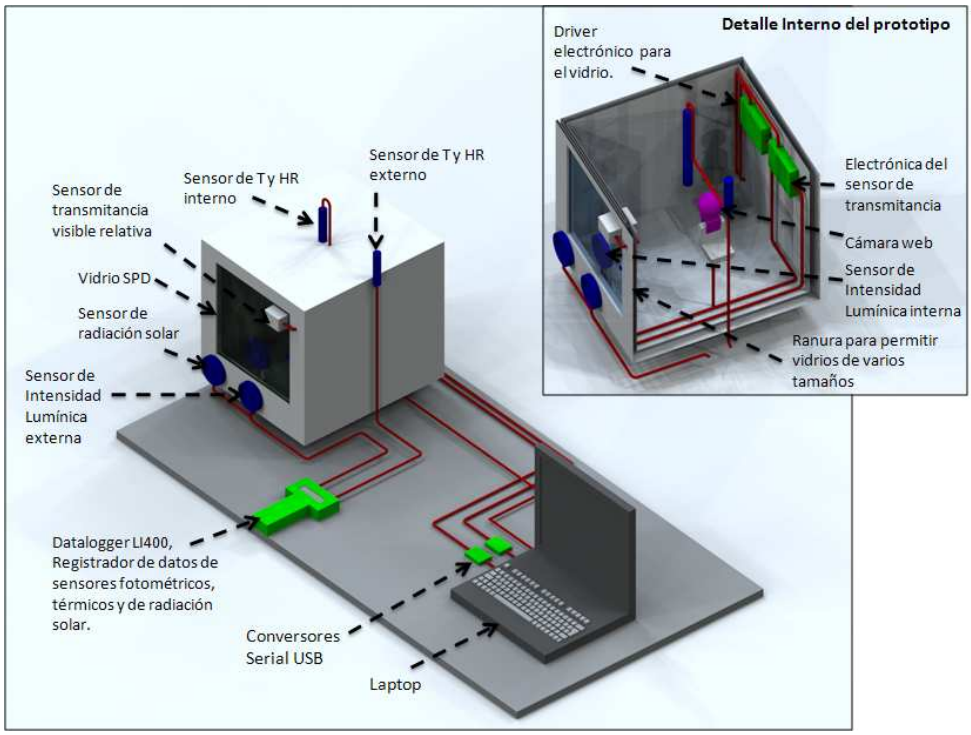


Figura 3.2: Diseño del prototipo para las pruebas.

3.1. Planta Física

Para el diseño del módulo físico se tuvo en cuenta tanto las variables manipuladas de interés directo que interactúan dentro del sistema de control y las no manipuladas las cuales no se consideraron en la concepción previa como fundamentales pero si eran de interés registrar y de forma experimental observar su influencia o no sobre la planta. Por tanto el prototipo se instrumentó con un sensor de transmitancia de luz visible, dos sensores de temperatura, uno en la cara externa y otro en la cara interna del vidrio. Estos tres sensores se construyeron en base a un diseño electrónico y sus lecturas fueron integradas al Matlab a través de una interfaz de hardware propia. Por otra parte, el prototipo también se dotó con un sensor de temperatura y humedad relativa del ambiente, un sensor de la radiación solar que llega de forma perpendicular a la cara externa de la ventana y dos sensores fotométricos de alto desempeño, uno en la cara externa y otro en la cara interna del vidrio. Estos cuatro conectados a un equipo externo, registrador de datos Licor 400. La estructura del sistema que alberga dichos sensores se ilustra en la Figura 3.2 y su escala se definió de tal forma que permitiera la fácil portabilidad y así poder ser sometido a diferentes pruebas de campo.

Figura 3.3: Prototipo construido.

3.2. Actuador - Driver Electrónico

Se diseñó, simuló y construyó un driver electrónico, actuador de la planta construida usado para regular la transmitancia del vidrio. Según el principio de funcionamiento del dispositivo SPD, éste responde a la variación del voltaje Vrms de una señal alterna de un rango de 0-115Vrms. Por tanto se hizo necesario construir un dispositivo que suministrara dicho voltaje variable bajo los siguientes criterios:

- El dispositivo debe ser digital y manejado por el PC, éste último le ordenará mediante un comando V_{code}, el porcentaje de voltaje que se desea suministrar al SPD. Esto con el objetivo de aplicar señales desde el computador con fines de modelamiento y control basado en software en tiempo real.
- Debe suministrar el voltaje en pasos de igual magnitud y de resolución pequeña, de tal forma que la salida de voltaje del dispositivo respecto al porcentaje deseado sea lo menos discreta y más lineal posible.

Se diseñó un manejador para el SPD basado en control por fase o ángulo de conducción. Este control de potencia se logra controlando uno o varios dispositivos de conmutación generalmente tiristores. El tiristor se encuentra normalmente en

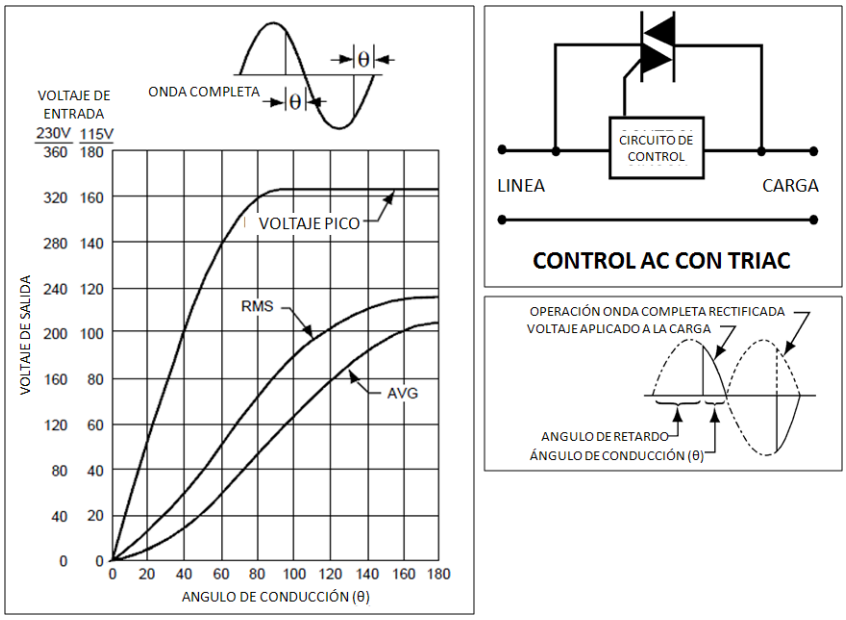


Figura 3.4: Principio de funcionamiento de control por fase de onda senoidal [34].

su estado *OFF* de no conducción por tanto bloquea el flujo de corriente en el circuito. Cuando el tiristor es activado por una circuitería de control pasa a su estado de conducción *ON* y permite la circulación de la corriente [34]. Cuando dichas conmutaciones se hacen dentro del periodo de la onda senoidal de 60Hz bloqueando o dejando pasar un porcentaje de la onda, el resultado es una variación del voltaje RMS. Este principio es ilustrado en la Figura 3.4. Este tipo de control brinda la posibilidad de obtener un paso de voltaje pequeño y además preciso, su desventaja es la forma de onda al no ser puramente senoidal, aunque no se consideró un problema ya que las cargas SPD son sensibles al voltaje RMS.

El dispositivo de control de fase fue realizado a través de un triac y un circuito de control basado en un microcontrolador PIC16F877A quien define los tiempos de conducción de la señal senoidal de 120VAC obtenida de la red eléctrica. El funcionamiento es ilustrado en el diagrama de bloques de la Figura 3.5. El circuito fue simulado en PROTEUS ISIS 7 Professional para la correcta depuración de los tiempos y ángulos de conducción y posteriormente fue diseñada la tarjeta en Eagle 5.0. Una fotografía es presentada en la Figura 3.6. El diseño consta con las siguientes características:

- Linealidad: Como se observa en la Figura 3.4 la relación entre el voltaje de salida RMS y el angulo de conducción es una relación no lineal. La forma de

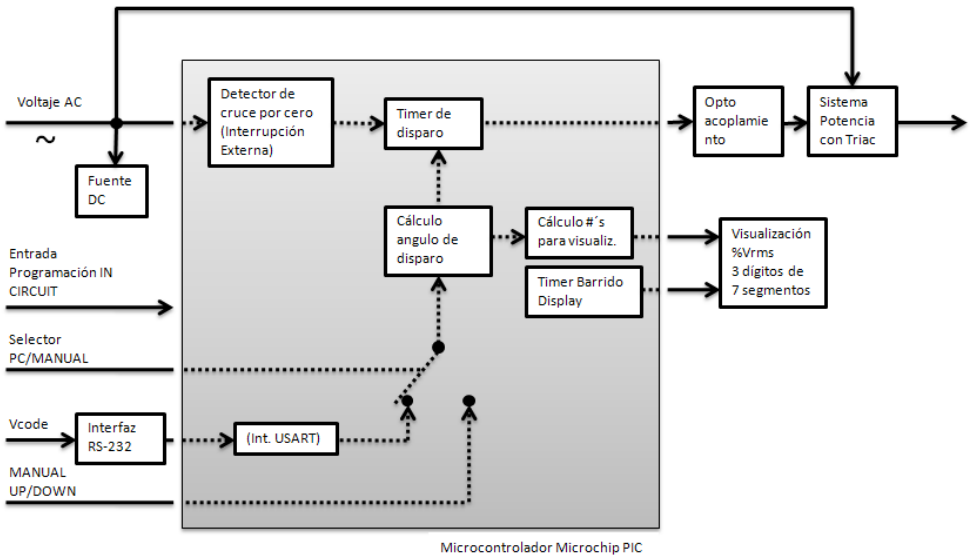


Figura 3.5: Diagrama de bloques del driver diseñado

.

volver esta relación lineal fue definir comandos digitales que corresponden a ángulos de conducción específicos espaciados de tal forma que brindan una relación lineal. La respuesta entrada-salida medida del dispositivo terminado fue satisfactoria respecto a la linealidad deseada y puede observarse en la Figura 3.7.

- Resolución 2.5 % (de 5 % a 95 % con paso de 2.5 % 37 pasos de 6 a 114Vrms en incrementos de 3v).
- Comunicación serial RS232 bidireccional para conexión con el PC a través de Matlab Windows Target.
- Switch para elegir entre el modo MANUAL donde se controla la salida mediante pulsadores UP/DOWN o modo AUTO donde se controla la salida a través del PC mediante la interfaz RS232.
- Visualización mediante display del porcentaje de voltaje RMS actual en la salida [5-95 %].
- Interfaz RS232-USB para poder conectarse a equipos portátiles actuales que ya no poseen puerto serial RS232.
- Programación PIC ICSP (*In-circuit-Serial-Programming* para realizar modificaciones al programa del Microcontrolador PIC sin desinstalarlo de la

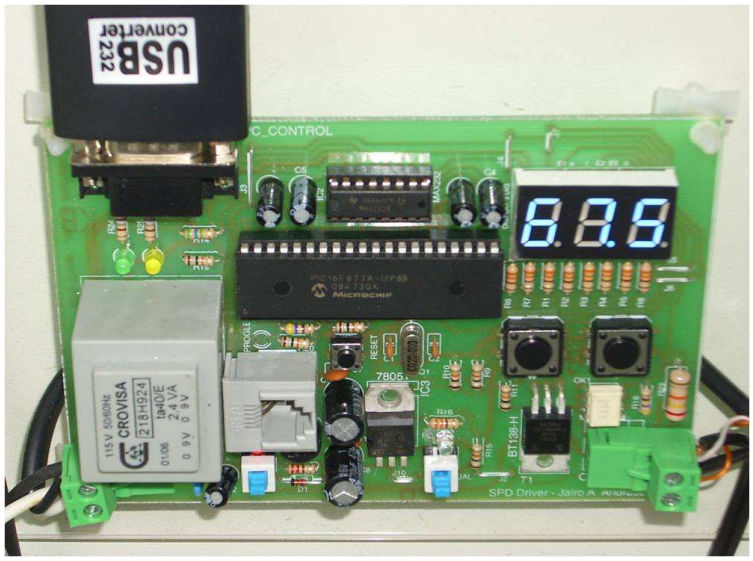


Figura 3.6: Fotografía del actuador construido

.

tarjeta).

3.3. Sensores y Adquisición de señales

3.3.1. Sensor de transmitancia de luz visible

La medición de transmitancia de luz visible atribuída a determinado material traslúcido Ec. 3.1, es una medida normalizada o porcentual de la cantidad de luz que atraviesa el material desde la cara exterior hacia la cara interior.

$$T_v = \frac{Il_{interior}[lux]}{Il_{exterior}[lux]} \tag{3.1}$$

Medir el nivel de iluminación en el exterior producido por la luz solar implica utilizar un sensor de amplio rango teniendo en cuenta que en un día soleado podría llegar al orden de los 100000 *luxes*. En el orden de usar este tipo de sensores en varios de los vidrios que componen una fachada, la medición de dicha variable en forma directa no resulta económicamente práctica. Con el objetivo de emplear un sensor fotométrico de bajo costo se diseñó y construyó un sensor compuesto de un par emisor-receptor. El emisor ya no la luz solar corresponde a un diodo led de luz blanca con un patrón de radiación direccional y el receptor a un fototransistor de luz ambiente con Filtro IR de bajo costo. La elección por la luz blanca es debido

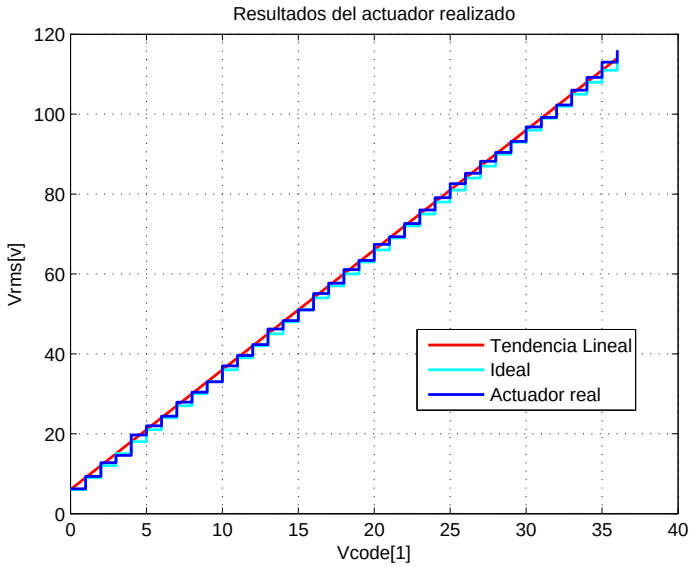


Figura 3.7: Entrada-Salida del actuador electrónico

a que su espectro contiene la mayor cantidad de longitudes de onda. El emisor fue ubicado justo en la frontera correspondiente a la cara exterior del vidrio y el receptor en la interior como se observa en la Figura 3.8. A medida que el material varía sus propiedades ópticas, la señal recibida por el fototransistor conectado en su región activa cambia de manera continua [6]. Tanto el emisor como el receptor fueron encapsulados para evitar en lo posible la incidencia de otras fuentes de luz en la medición. El empleo de un par emisor receptor, garantiza que los niveles de iluminación que llegan al fotodetector están por el orden de los 5000 *luxes*.

Como lo que interesa medir es la transmitancia de luz visible, tanto el led como el fototransistor fueron elegidos de tal forma que tuvieran en lo posible sincronía espectral con lo que para el ojo humano se considera como luz visible. En la Figura 3.9 se ilustran los espectros de la luz emitida por el led, la recibida por el fotodetector y la curva definida por CIE (Comisión Internacional de iluminación) [27] correspondiente al espectro visible de un observador humano común en el día. La validación del sensor se realizó comprobando su respuesta con la respuesta medida con dos sensores fotométricos de alto desempeño que miden la transmitancia directamente, registrando la luz externa e interna en los bordes del SPD. Los resultados de dicha comparación se muestran en la figura 3.10, allí es posible observar que los resultados son muy satisfactorios y la medida tomada de nuestro sensor es adecuada. Tal como se esperaba la relación entrada-salida del dispositivo SPD es una función no lineal como se mencionó en [25] y se mostró en la Figura 2.12. Sin

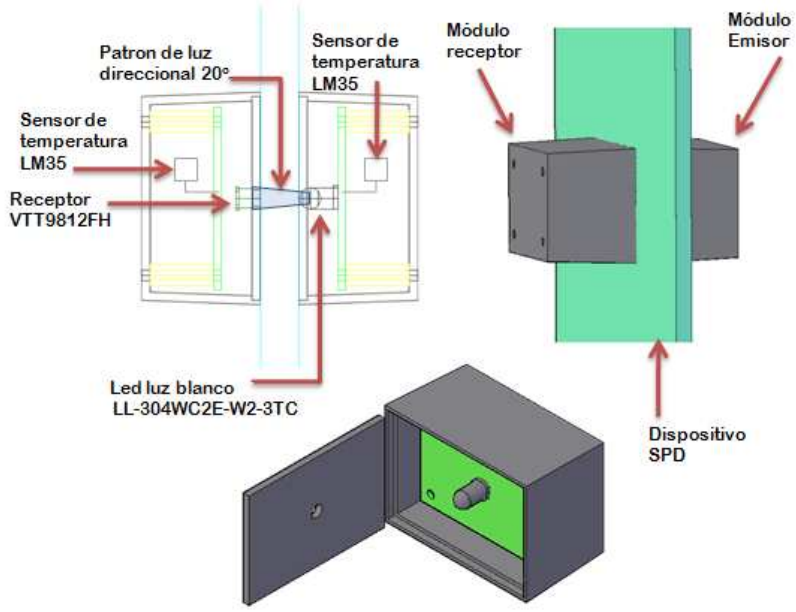


Figura 3.8: Sensor de transmitancia de luz visible.

embargo una región comprendida entre los 30 y 60Vrms puede ser aproximada a lineal.

Adicional a medir la transmitancia de luz visible, a través de sensores de radiación solar fue también calculada la transmitancia de luz infraroja del SPD, los resultados de dicha prueba se registran en la Figura 3.11. La gráfica muestra que su comportamiento es diferente respecto a la luz visible, en cierta forma el SPD bloquea gran parte de la radiación infraroja, y su rango de transmitancia se encuentra entre el 20 y el 40 % frente al rango de 1 al 73 % de la luz visible. Esto confirma la aplicabilidad potencial de dispositivos SPD para disminuir la carga térmica en las construcciones.

3.3.2. Sensores de temperatura

Inmersos en los encapsulamientos de los módulos emisor y receptor ilustrados en la figura 3.8 se instalaron dos sensores de temperatura de estado sólido. Tales sensores son útiles para registrar las temperaturas interior y exterior del vidrio al momento de las pruebas y de esta forma observar el efecto de dicha variable sobre el sistema finalmente diseñado.

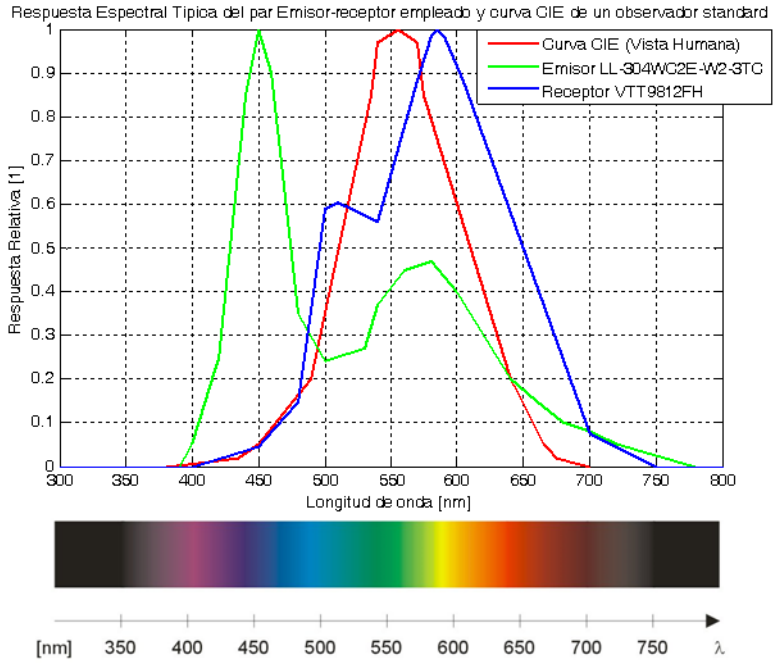


Figura 3.9: Comparación de la respuesta espectral del par emisor-receptor empleado en sensor de transmitancia de luz visible.

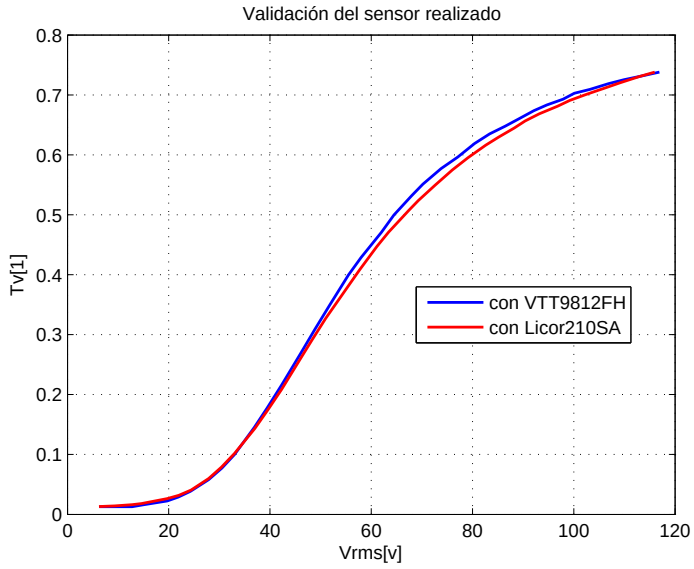


Figura 3.10: Resultado del sensor

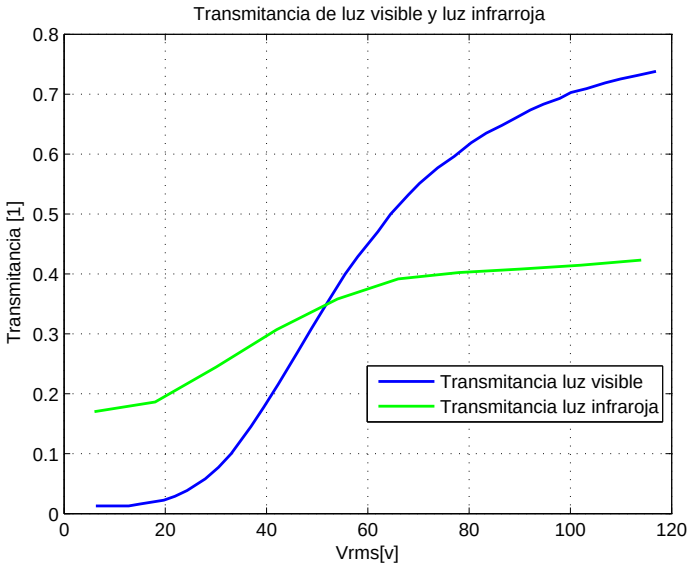


Figura 3.11: Transmitancia de luz en los espectros visible e infrarojo.

3.3.3. Interfaz de hardware para conexión con Matlab en tiempo real.

Un circuito electrónico que convierte las señales análogas provenientes de los tres sensores en señales digitales y se comunica serialmente con el PC fue necesario diseñar y construir. El diagrama de bloques de la Figura 3.12 ilustra el funcionamiento de dicho circuito. El circuito realiza funciones de acondicionamiento de señal, digitalización y comunicación a través de un protocolo RS232. Esto permite usar el prototipo en tiempo real con Simulink en su modo externo, a través de las herramientas del puerto serial que brindan los toolbox de Matlab Windows Target y Matlab Workshop. Una fotografia del circuito es ilustrada en la Figura 3.13. Dicho diseño tiene las siguientes características:

- Circuito electrónico basado en microcontrolador Microchip PIC16F876.
- Acondicionamiento de señales con amplificadores operacionales de instrumentación de la marca Analog Devices, conocidos por su buen desempeño en dispositivos de instrumentación.
- Comunicación serial RS232 bidireccional para conexión con el PC a través de Matlab Windows Target.
- Visualización mediante display del valor de transmitancia. [0-255]

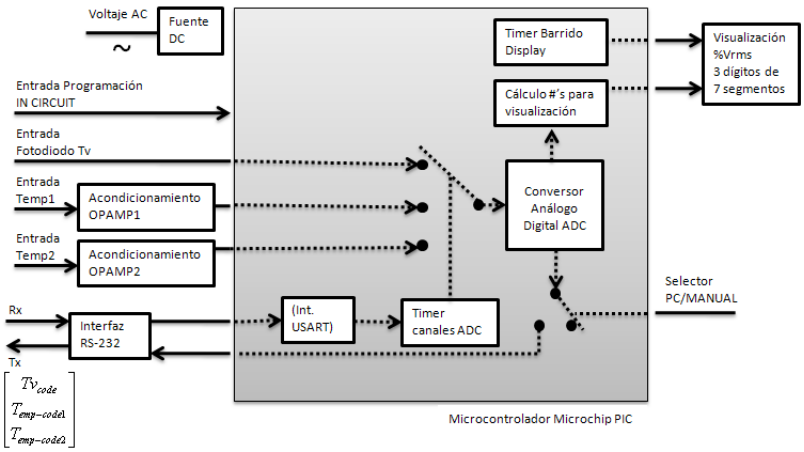


Figura 3.12: Diagrama de bloques de la interfaz de adquisición de señales diseñada

.

Figura 3.13: Fotografía de la interfaz sensorial

.

- Switch para elegir entre el modo MANUAL donde el circuito muestra en el display el valor de transmitancia de luz visible independiente de si esta conectado o no a un PC, o modo AUTO donde el dispositivo establece una comunicación serial mediante una interfaz RS232 con el PC.
- Interfaz RS232-USB para poder conectarse a equipos portátiles actuales que ya no poseen puerto serial RS232.
- Programación PIC ICSP (*In-circuit-Serial-Programming* para realizar modificaciones al programa del Microcontrolador PIC sin desinstalarlo de la tarjeta).

Capítulo 4

Modelamiento

No es suficiente el conocimiento obtenido en la literatura encontrada acerca del comportamiento físico de la transmitancia de luz visible del dispositivo de partículas suspendidas para poder realizar un modelamiento adecuado basado únicamente en el análisis teórico. Por ésta razón se hizo conveniente obtener y validar un modelo de forma experimental, mediante técnicas de identificación. Esto además es una buena práctica para verificar los datos suministrados por el fabricante [30], así como para observar comportamientos que normalmente los fabricantes no incluyen en sus hojas de datos, tales como las constantes de tiempo y el retardo entrada-salida.

4.1. Descripción del sistema

En la figura 4.1 se ilustra un diagrama de bloques del sistema. Un actuador electrónico convierte el código digital hexadecimal $Vcode$ (0x00h-0x24h) proveniente del ordenador, en un voltaje eficaz $Vrms$ (6-114v) de una señal de voltaje alterno, y de esta manera excita al dispositivo de partículas suspendidas SPD. El SPD responde a dicha excitación alineando las partículas de su interior haciendo 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 un voltaje de corriente continua (0-5v), éste cambio es proporcional a la transmitancia de luz visible Tv (0-1). Por medio de un circuito electrónico la señal analógica proveniente del fotosensor es tratada y convertida en un código digital hexadecimal $Tvcode$ (0x00h-0xFFh) quedando a disposición de lectura del ordenador quien actúa como controlador digital.

Finalmente, la planta sobre la que actúa el controlador se compone por el conjunto

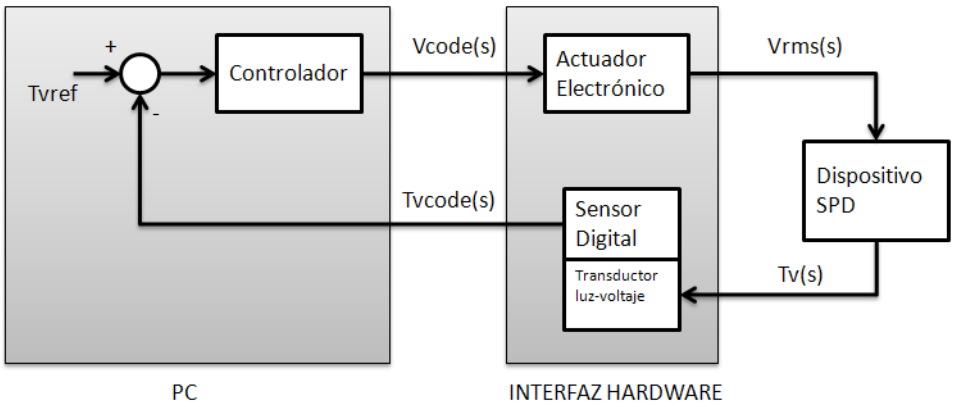


Figura 4.1: Diagrama de Bloques del sistema de control digital del dispositivo SPD

Actuador + SPD + Sensor.

4.2. Modelamiento Teórico

Una función de transferencia teórica para modelar la planta puede hallarse de la siguiente forma:

Actuador Electrónico: Tal como se observa en la Figura 3.7, la relación entre el código de voltaje $Vcode$ y el voltaje entregado al SPD es lineal. Por tanto dicho valor se puede modelar como una función de la forma:

$$Vrms(s) = K_{act}Vcode(s) + bias1 = 3Vcode(s) + 6 \tag{4.1}$$

Dispositivo SPD: Como se mostró en la sección 3.3.1, se sabe del comportamiento no lineal de la curva entrada-salida del dispositivo SPD. Por tanto la primera consideración en el diseño es definir un voltaje máximo aceptable, el cual suministra un estado suficientemente claro de la carga SPD y un voltaje mínimo quien a su vez suministra un estado suficientemente oscuro y cuyo rango puede considerarse válido para ejecutar un modelamiento de tipo lineal. El rango de $33-60Vrms$ corresponde aproximadamente al $8-50\,\%$ de transmitancia. La cota superior de $50\,\%$ es adecuada como valor suficientemente claro teniendo en cuenta que la capacidad máxima de transmitancia de luz posible con nuestra carga SPD en particular es de aproximadamente el $73\,\%$ como se registró en la figura 3.10.

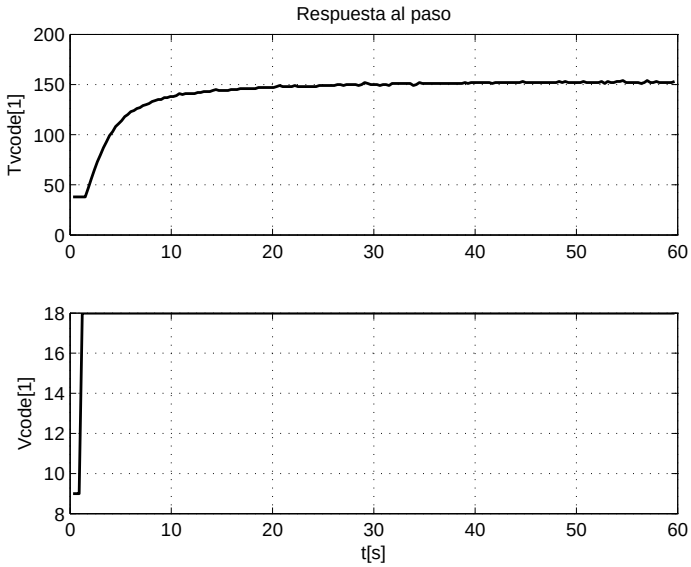


Figura 4.2: Respuesta al paso del sistema

El modelo eléctrico más simple de un dispositivo SPD es el de un circuito RC de primer orden según se ilustró en la sección 2.2.2. Una resistencia relacionada con los electródos y los cables, un condensador formado por las dos capas de material conductivo transparente y un dieléctrico depositado en el medio de las capas. Sin embargo se hace necesario verificar como es la respuesta en el tiempo y en la frecuencia de la transmitancia frente al voltaje aplicado, si es similar como se estima, al del voltaje en el condensador del circuito RC, ya que este tipo de comportamiento no fue encontrado en las referencias bibliográficas. Por ésta razón, en un principio se obtuvo experimentalmente la respuesta al paso del sistema ilustrada en la Figura 4.2 con un sencillo experimento realizado en Simulink en modo Externo y utilizando Real Time Workshop y Real Time Windows Target.

La respuesta al escalón hallada experimentalmente, ilustrada en la figura 4.2 puede aproximarse a una función de transferencia de primer orden con retardo:

$$SPD(s) = \frac{Tv(s)}{Vrms(s)} = \frac{K_{spd}}{\tau_p s + 1} e^{-L_{spd} s} \tag{4.2}$$

o a una de segundo orden sobreamortiguado:

$$SPD(s) = \frac{Tv(s)}{Vrms(s)} = \frac{K_{spd}}{(\tau_{p1} s + 1)(\tau_{p2} s + 1)} e^{-L_{spd} s} \tag{4.3}$$

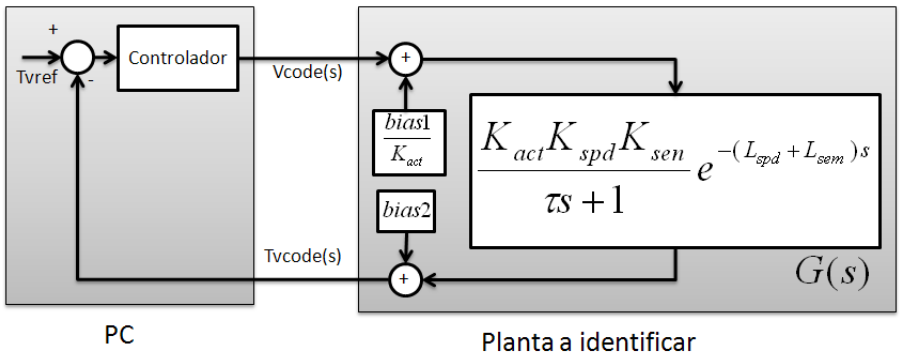


Figura 4.3: Estructura teórica de la planta a identificar.

siendo Kp la ganancia estática, τ_{pk} uno o más constantes de tiempo y L un posible retardo en el tiempo antes de que el sistema responda a la entrada.

Sensor: El sensor se compone de un transductor de tipo fototransistor, el cual convierte la luz que atraviesa de un lado a otro del vidrio en un voltaje DC, y un circuito electrónico digital que convierte dicha señal en un código digital $Tvcode$. Por tanto el comportamiento completo del sensor puede ser representado por una función proporcional y un retardo en el tiempo, ya que el circuito se tarda como mínimo una intervalo de muestreo en realizar las operaciones:

$$Tvcode(s) = \left(\frac{Tvcode_{max} - Tvcode_{min}}{Tv_{max} - Tv_{min}}\right) e^{-L_{sen}s} Tv(s) + bias2 \tag{4.4a}$$

$$Tvcode(s) = K_{sen} Tv(s) e^{-L_{sen}s} + bias2 = \left(\frac{229-4}{0{,}738-0{,}013}\right) e^{-L_{sen}s} Tv(s) + 0{,}06 \tag{4.4b}$$

$$Tvcode(s) = 310{,}325 e^{-L_{sen}s} Tv(s) + 0{,}06 \tag{4.4c}$$

Por tanto uniendo las anteriores ecuaciones, la estructura del modelo completo (actuador + SPD + Sensor) asumiendo fuera de primer orden tendría una forma similar a la ilustrada en la figura 4.3.

Y la función de transferencia a identificar tendría la forma:

$$G(s) = \left(\frac{K_p}{\tau s + 1}\right) e^{-Ls} \tag{4.5}$$

4.3. Obtención del modelo mediante métodos de Identificación.

La identificación de un sistema, implica un proceso experimental e iterativo que comprende principalmente los siguientes pasos [8]:

- *Obtención de la información experimental:* Esto comprende desde el diseño del experimento, la elección del tipo de entrada, periodo de muestreo, número de muestras y posterior a la realización del experimento, el tratamiento de los datos obtenidos para ser utilizados sin inconvenientes en el análisis.

- *Estimación de modelos:* Se elige una estructura matemática del modelo y posteriormente se estiman sus parámetros.

- *Validación del o los modelos escogidos:* Se realizan distintas pruebas y comparaciones de los modelos estimados para asegurarse del buen desempeño del modelo o los modelos escogidos.

A continuación, se ilustran los resultados de los experimentos y el análisis de los modelos estimados.

4.3.1. Identificación no paramétrica en el dominio del tiempo mediante la respuesta transitoria.

La respuesta transitoria ilustrada en la figura 4.2 permite obtener una buena aproximación de la ganancia estática, constante de tiempo y retardo del sistema a identificar. De los datos de tal respuesta, la entrada paso se aplicó en el tiempo $t = 1{,}2s$, en ese momento la condición inicial es $Tvcode(0) = 38$. Los datos que circundan tal instante son:

```
Datospaso =

    0.9000    9.0000   38.0000
    1.2000   18.0000   38.0000
    1.5000   18.0000   38.0000
    1.8000   18.0000   47.0000
```

donde la primera columna representa el tiempo t, la segunda, la entrada $Vcode$ y la tercera la salida $Tvcode$. Es posible observar como la salida empieza a responder en la segunda muestra después del paso en el tiempo $t = 1{,}2s$, por lo que se podría asegurar que el tiempo muerto del sistema está entre $0 \leq L \leq 0{,}3s$

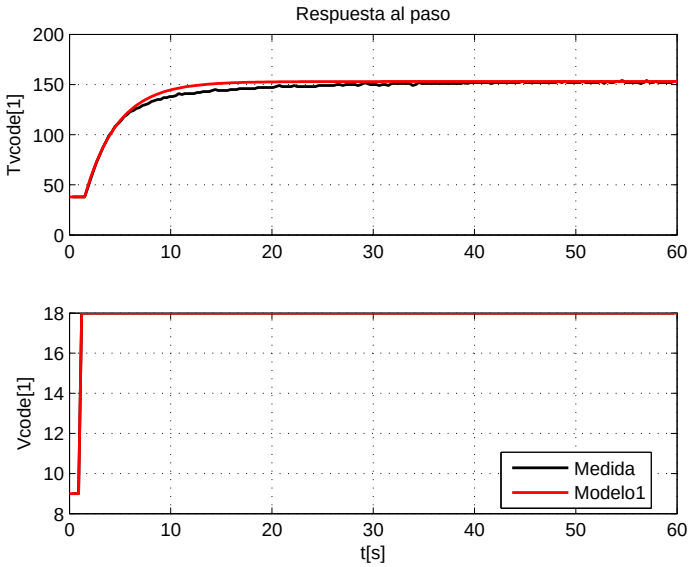


Figura 4.4: Respuesta al paso del modelo1

La ganancia estática se puede obtener con los valores finales de la entrada y la salida:

$$K_p = \frac{Tvcode_{ss}}{Vcode_{ss}} = \frac{153 - 38}{18 - 9} = 12{,}7778 \tag{4.6}$$

Para hallar la constante de tiempo, de los datos de la figura 4.2 se obtiene que la señal alcanza el 63 % de su valor final en el tiempo $t = 4{,}745$, como la entrada se aplicó en $t = 1{,}2s$ y descontando el tiempo muerto, la constante de tiempo tendria un valor de $\tau = 3{,}245s$. Finalmente, un primer acercamiento al modelo basado en el análisis de la respuesta transitoria estaria dado por la expresión 4.7 y su respuesta en el tiempo comparada con la respuesta medida es ilustrada en la Figura 4.4.

$$G(s) = \frac{12{,}777}{3{,}245s + 1} e^{0{,}3s} \tag{4.7}$$

4.3.2. Identificación paramétrica empleando System Identification Toolbox de MATLAB

El anterior modelamiento basado en la respuesta transitoria, nos brinda una información inicial importante para el análisis de nuestro sistema, sin embargo por

Tabla 4.1: Características de la prueba realizada para la obtención de datos experimentales de la planta SPD.

Características de la prueba	
Tiempo de muestreo del sistema	$300ms$
Tipo de entrada	Binaria pseudoaleatoria
Niveles de entrada	Nivel Alto = Código decimal 9 Nivel Bajo = Código decimal 18
Probabilidad de cero	0,4
Muestreo de la señal de entrada	$900ms$
Tiempo de la prueba	$300s$
No. de muestras	1000

su simpleza, es muy probable que dicho modelo no reproduzca con exactitud la totalidad de características dinámicas del sistema en estudio, por tal motivo es necesario realizar otros experimentos que permitan obtener datos con información más significativa.

Obtención de datos experimentales.

Asumiendo el sistema lineal dentro del rango indicado anteriormente (8-50 % de transmitancia), se realizó una prueba con las consideraciones técnicas ilustradas en la Tabla 4.1. Los resultados de entrada-salida pueden ser observados en la Figura 4.5.

Estimación de comportamientos basado en los datos experimentales.

En primer lugar, se define un intervalo de estimación que corresponde $ze : (10 - 310muestras)$ para el análisis. De dicho conjunto es posible estimar la respuesta al impulso del sistema ilustrada en la Figura 4.6. La región amarilla demarca un intervalo de confianza del 99 %. Se puede observar en dicha figura, como la salida responde en la segunda muestra después de aplicar la entrada como se observó anteriormente, lo que indica un retardo de transporte o tiempo muerto de $300ms$, causado muy seguramente más por la respuesta del sensor digital que por la dinámica del dispositivo SPD.

De igual forma, de los datos anteriores es posible estimar la respuesta en frecuencia del sistema la cual se observa en la Figura 4.7. De dicha respuesta, podemos obtener un segundo modelo tentativo de primer orden teniendo en cuenta la in-

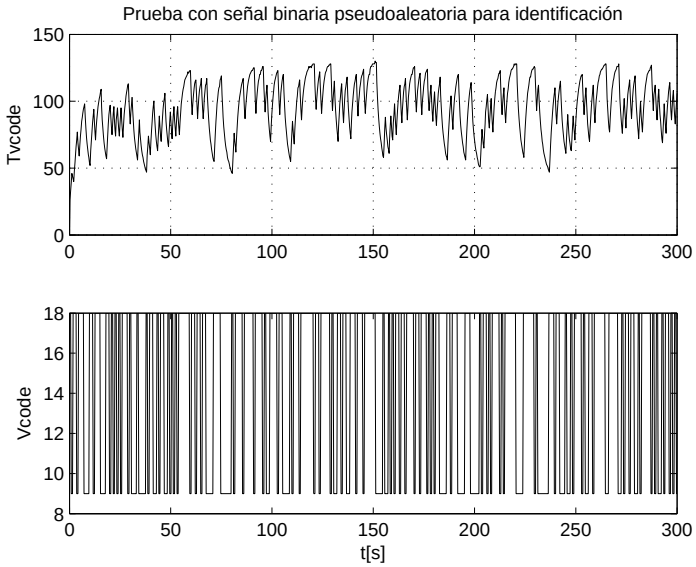


Figura 4.5: Obtención de datos para identificación

formación que brinda.

$$\omega_b = 0{,}855[rad/s] \tag{4.8a}$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_b} = 1{,}169s \tag{4.8b}$$

$$K_p = T(j\omega = 0) = 7{,}227 \tag{4.8c}$$

$$G_2(s) = \frac{7{,}227}{1{,}169s + 1} e^{-0{,}3s} \tag{4.8d}$$

donde ω_b es la frecuencia de corte del sistema y $T(j\omega = 0)$ es la amplitud a frecuencias muy bajas.

Definición de estructuras de modelos para identificación.

Entre las estructuras mas simples están la estructura polinomial ARX y la representación en espacio de estados. La primera tiene la forma

$$A(q^{-1}, a_i)y(t) = B(q^{-1}, b_i)u(t) + e(t) \tag{4.9}$$

donde A y B son polinomios que dependen del operador q^{-1} y de los vectores de parámetros a_i y b_i respectivamente. $y(t)$ es la salida del sistema, $u(t)$ es la entrada

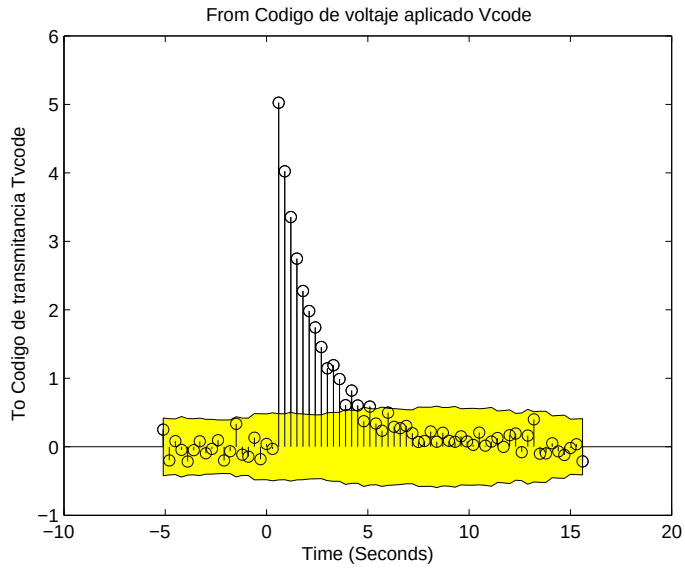


Figura 4.6: Estimación de la Respuesta al impulso del sistema.

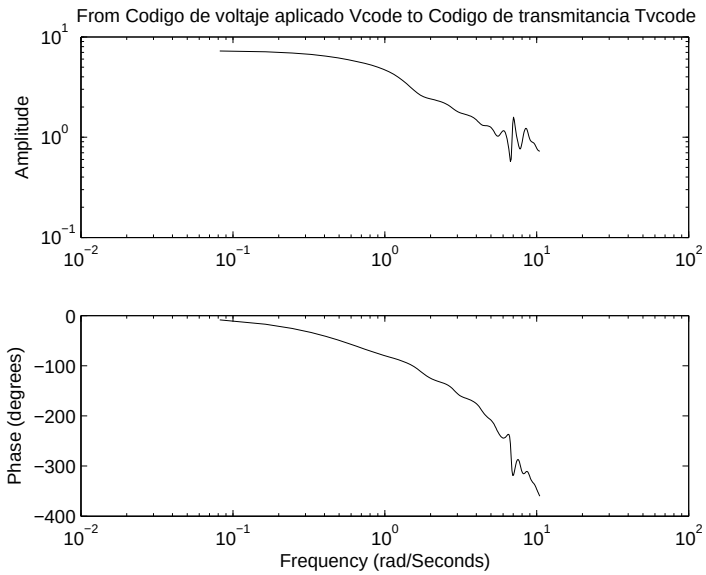
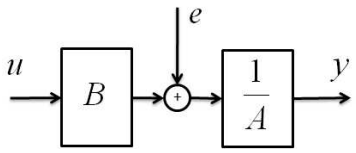
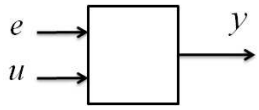


Figura 4.7: Estimación de la Respuesta en frecuencia del sistema.

Tabla 4.2: Estructuras para identificación.

Estructura	Forma
ARX	 $A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} B_i(q)u_i(t - nk_i) + e(t)$
SS	 $\dot{x}(kT+T) = Ax(kT) + Bu(kT) + Ke(kT)$ $y(t) = Cx(kT) + Du(kT) + e(kT)$ $x(0) = x0$

y $e(t)$ es la entrada de ruido del sistema. Los polinomios tienen la forma

$$A(q^{-1}, a_i) = 1 + a_1 q^{-1} + ... + a_{na} q^{-na} \tag{4.10a}$$

$$B(q^{-1}, b_i) = b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + ... + b_{nb} q^{-nk-nb-1} \tag{4.10b}$$

donde na y nb representan el orden de los anteriores polinomios, y nk el retardo entre la entrada y la salida.

Un representación en espacio de estados describe el sistema por un conjunto de de ecuaciones diferenciales o en diferencias de primer orden. Dicha representación en tiempo discreto tendría la forma

$$\begin{aligned} \dot{x}(kT+T) &= Ax(kT) + Bu(kT) + Ke(kT) \\ y(t) &= Cx(kT) + Du(kT) + e(kT) \qquad (4.11) \\ x(0) &= x0 \end{aligned}$$

$$(4.12)$$

donde A, B, C, D y K son matrices que contienen los parámetros del modelo. T es

Tabla 4.3: Modelos estimados para comparación.

Modelo	Características
G1	Función de transferencia primer orden hallada en la ecuación 4.7
G2	Función de transferencia primer orden hallada en la ecuación 4.8
ss1	Espacio de estados de primer orden $nx = 1$ (Estimación por método de predicción de error *pem*)
ss2	Espacio de estados de segundo orden $nx = 2$ (Estimación por método de predicción de error *pem*)
ssbest	Espacio de estados de orden tres $nx = 3$ (Estimación por método de predicción de error *pem*)
Arx2	Arx de ordenes $na = 1$; $nb = 1$ y $nk = 2$ (Estimación por mínimos cuadrados)
Arxbest	Arx de orden mayor $na = 3$; $nb = 3$ y $nk = 2$. (Estimación por mínimos cuadrados)

el tiempo de muestreo, $u(kT)$ la entrada en el tiempo kT, e $y(kT)$ es la salida en el instante kT. Las anteriores estructuras son ilustradas gráficamente en la Tabla 4.2.

Estimación de modelos.

Una vez se han definido estas dos estructuras, se estimaron varios modelos de distinto orden y número de parámetros a través de los recursos del Toolbox.

En la Tabla 4.3 se ilustran las características de cada modelo estimado relacionado con un color para utilidad en las siguientes comparaciones. Sus comportamientos en el tiempo y en la frecuencia son comparados en las Figuras 4.8 y 4.9. En la respuesta en frecuencia de la Figura 4.8 todos presentan una similitud acertada con excepción de los modelos de primer orden $G1$ y $ss1$, lo cual descarta en cierta forma que el sistema pueda ser representado por un modelo de primer orden. En la respuesta en el tiempo de la Figura 4.9, $ss1$, $ss3$, $G1$ y $G2$ no tienen buena similitud.

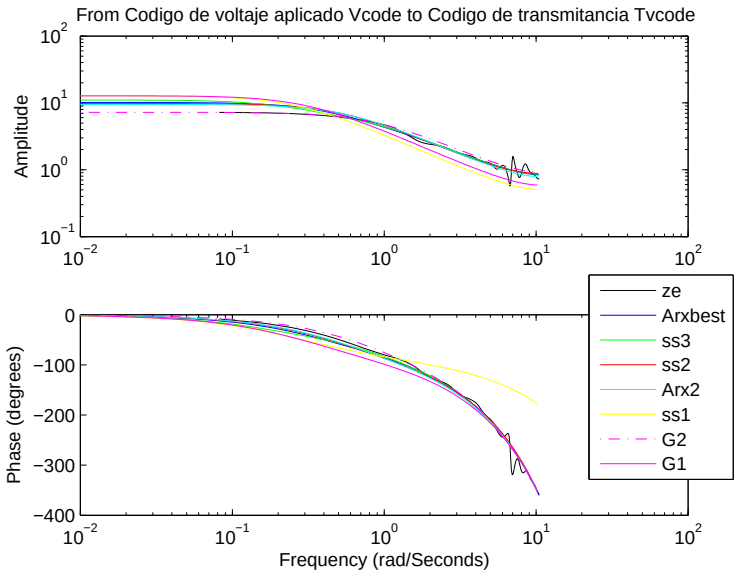


Figura 4.8: Comparación de la respuesta en frecuencia de distintos modelos.

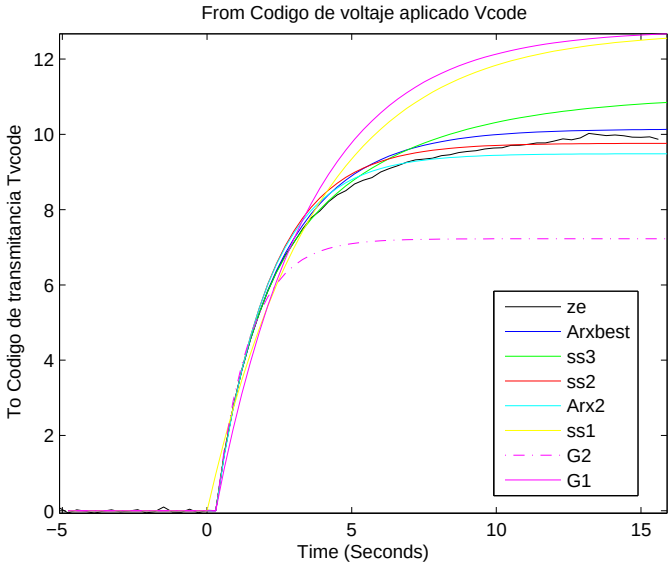


Figura 4.9: Comparación de la respuesta transitoria de distintos modelos.

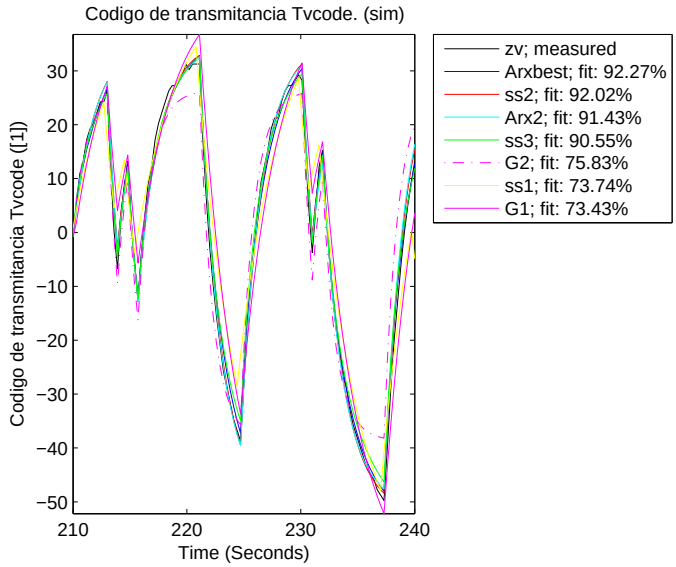


Figura 4.10: Comparación de distintos modelos.

Validación.

Para comparar el desempeño cuantitativamente, y conocer que tan efectivos pueden llegar a ser los modelos hallados, se selecciona un intervalo de datos de validación $zv(700:800 muestras)$ diferente al de los de estimación y se compara la respuesta de los modelos con los datos medidos. El resultado de la comparación se ilustra en la Figura 4.10.

Dicha comparación consiste en el calculo de la salida del modelo yh en el intervalo de validación zv sobrepuesto a los datos experimentales. El valor *fit* representa el acople del modelo a los datos experimentales, y es calculado a través de la expresión 4.13.

$$fit = 100 * \left(1 - \frac{|yh - y|}{|y - \bar{y}|}\right) \tag{4.13}$$

El modelo $Arxbest$ es el que mejor acople tiene respecto a los datos experimentales con un $fit = 92{,}27\,\%$ lo cual estaría muy bien, sin embargo es un modelo de cuarto orden. El modelo $ss2$ es un modelo en espacio de estados de segundo orden y también tiene un fit bueno del $fit = 92{,}02\,\%$. Por lo tanto, debido a que la diferencia de un orden mayor a 2 no es tan significativa, y los modelos de primer orden fueron descartados, la elección es por el modelo $ss2$. Dicho modelo tiene la

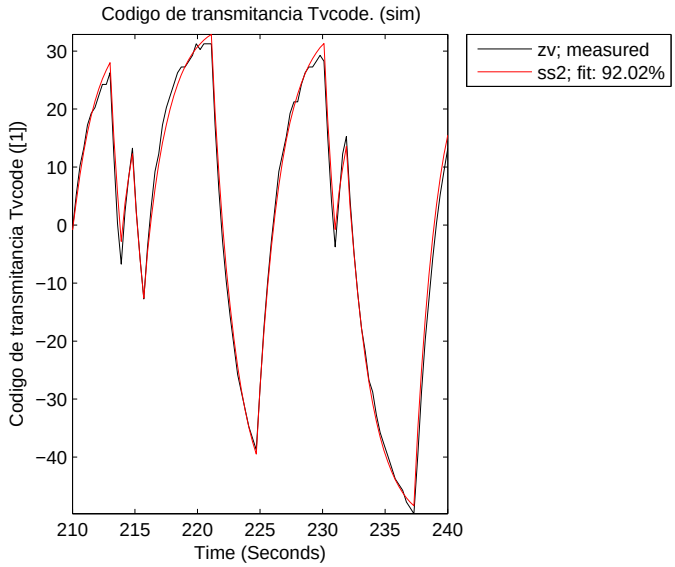


Figura 4.11: Acople del modelo escogido.

siguiente representación de espacio de estados en tiempo discreto:

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0{,}061 & 0{,}781 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1[k] \\ x2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0{,}004 \\ 1{,}5263 \end{bmatrix} u[k] + \begin{bmatrix} 1{,}0983 \\ 1{,}129 \end{bmatrix} e[k] \quad (4.14a)$$

$$y[k] = x_1[k] \quad (4.14b)$$

$$x[0] = \begin{bmatrix} -31{,}846 \\ -23{,}311 \end{bmatrix} \quad (4.14c)$$

$$T_s = 0{,}3s \quad (4.14d)$$

Donde $e[k]$ representa el ruido de entrada al sistema. En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 podemos observar los resultados individuales del modelo escogido $ss2$.

También es realizada una prueba de residuos del modelo presentada en la figura 4.14. Los residuos son las diferencias entre la salida medida y la salida predicha, o también llamados errores de predicción

$$\epsilon(t) = y(t) - y_e(t) \quad (4.15)$$

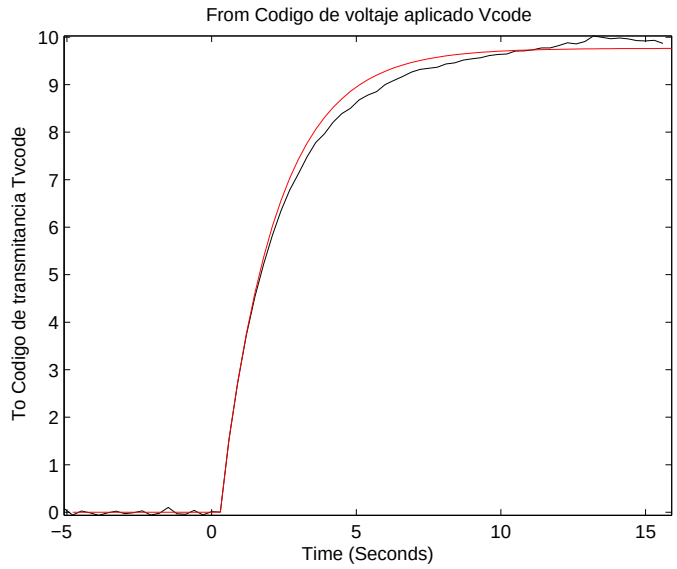


Figura 4.12: Respuesta transitoria del modelo escogido.

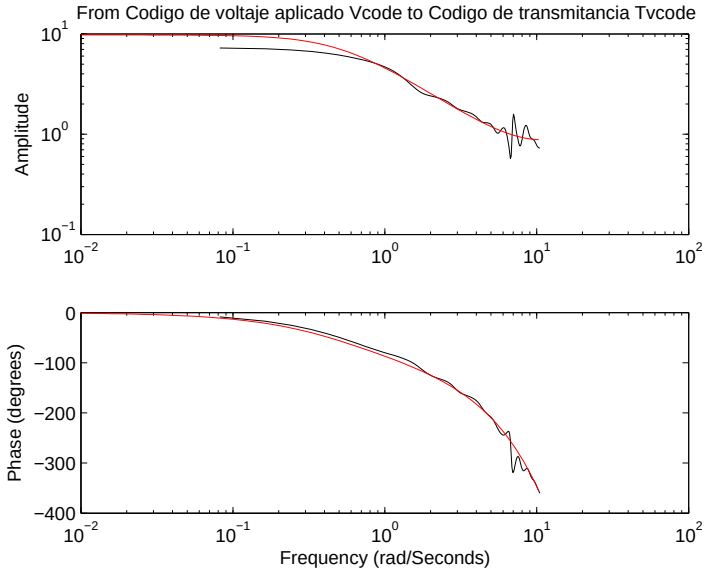


Figura 4.13: Respuesta en frecuencia del modelo escogido.

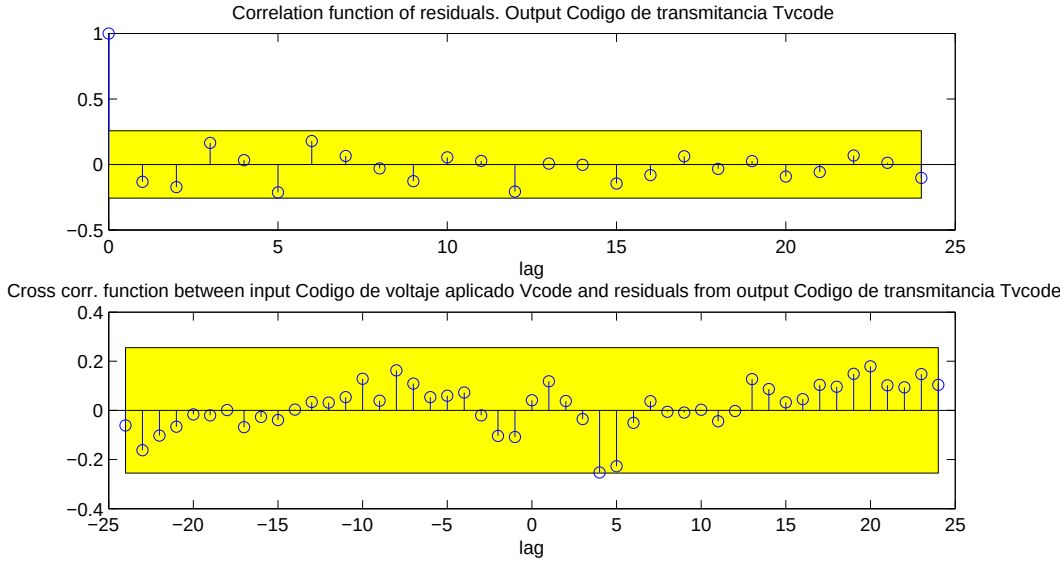


Figura 4.14: Analisis de residuos.

donde $y(t)$ la salida real o medida e $y_e(t,)$ es la salida estimada por el modelo.

La figura 4.14 presenta dos gráficos, el primero corresponde a la función de autocorrelación de los residuos $\epsilon(t)$, es decir la correlación cruzada de ϵ consigo misma tras un desfase τ, representada como

$$R_{\epsilon\epsilon} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \epsilon(t+\tau)\epsilon(t) \tag{4.16}$$

La segunda corresponde a la correlación cruzada entre los residuos y la entrada al sistema $u(t)$

$$R_{\epsilon u} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \epsilon(t+\tau)u(t) \tag{4.17}$$

Esta última es la más importante para los modelos de espacio de estados. Idealmente, se busca encontrar que los residuos sean independientes de la entrada, esta prueba es conocida como prueba de independencia, por tanto el modelo será mas exacto si los términos de dicha correlación son más cercanos a cero. Si existe evidencias de correlación, esto indica que el modelo no describe la forma como alguna parte de la salida se relaciona a la entrada [24]. Por tanto si se demuestra que la

expresión 4.17 es una distribución gaussiana de media $\mu = 0$ y varianza de la forma

$$P_r = \frac{1}{N} \sum R_\epsilon(k) R_u(k) \tag{4.18}$$

donde R_ϵ y R_u son las covarianzas de $\epsilon(t)$ y $u(t)$ respectivamente, entonces $\epsilon(t)$ y $u(t)$ son realmente independientes. Gráficamente en la correlación entre los residuos y la entrada, vista en la Figura 4.14 se calculan los límites como 2,58 desviaciones estándar $\pm 2{,}58\sqrt{P_r}$ y dicho intervalo se conoce como intervalo de confianza, representado por la región amarilla, el cual representa que los valores residuales depositados en dicha región tienen un 99 % de probabilidad de ser estadísticamente insignificantes. Como se observa en dicha figura, la correlación no sale del margen de validez, por tanto se estima que el sistema ha quedado bien caracterizado con el modelo elegido en la expresión 4.14.

4.4. Pruebas experimentales de temperatura.

Es conocido que los dispositivos de tecnología *electrochromics* tienen cierta dependencia con la temperatura. Según [22], fue caracterizada la velocidad de conmutación del dispositivo como una función de la temperatura. Fue mostrado como a temperaturas bajas el tiempo de conmutación es mas grande que a temperaturas más cálidas. Respecto a los dispositivos SPD, no se encontró evidencia bibliográfica donde se evaluara el desempeño de éstos ante la temperatura, por tal razón una de las inquietudes de ésta investigación es observar experimentalmente dicho comportamiento. Como se ilustró en la tabla 2.3, los tiempo de respuesta de los SPD es por el orden de pocos segundos, por tanto la prueba experimental ejecutada fué enfocada hacia observar durante un largo intervalo de tiempo si la temperatura tiene efecto sobre el valor de estado estable o ganancia de baja frecuencia.

La prueba consistió específicamente en variar la temperatura dentro de una cámara donde se insertó el prototipo a través de la inyección de aire caliente por medio de un calefactor eléctrico resistivo y la aplicación de luz a través de una lámpara halógena de tungsteno que emite radiación en el espectro del infrarojo cercano $(600 - 1500nm)$ durante un periodo de 4 horas aproximadamente. La Figura 4.4 ilustra la disposición de los elementos.

La Figura 4.16 muestra los resultados de la prueba de la siguiente forma: En la primera se muestra la salida del sistema: el código de transmitancia de luz visible alrededor de $\widetilde{Tvcode} = 192{,}547$ lo que corresponde a una transmitancia del 62,03 %, y la entrada de voltaje constante ($Vcode = 25$) lo que corresponde

Figura 4.15: Disposición de las pruebas de temperatura.

a un $Vrms = 81v$. La segunda gráfica de la Figura 4.16 muestra las medidas de temperatura de los sensores inmersos en los módulos emisor y receptor expuestos en la seccion 3.3.2, las cuales representan la temperatura en la cara externa e interna del vidrio. Esta medida tambien refleja la temperatura a que se expone el diodo led y el fotoreceptor. Tambien en dicha segunda gráfica se muestra la medida de temperatura y Humedad relativa del ambiente de la cámara en general. La tercera gráfica el estado de encendido y apagado de las dos fuentes de calor y radiación: El calefactor y el reflector. La cuarta y última muestra el nivel de radiación infraroja medido en la cara externa realizada por el piranómetro para radición solar directa Li200, el cual tiene una respuesta espectral en el infarojo cercano $400 - 1100nm$. También muestra el nivel de la luz visible justo en la cara interna del vidrio medido con el sensor Li210.

Debe tenerse en cuenta, que todo el dispositivo estuvo expuesto a los cambios de temperatura, por lo tanto no se está exento de que las lecturas de los sensores sean alteradas. Es conocido que la gran mayoría de los sensores fotométricos basados en fotodiodo son vulnerables en cierta tasa a la temperatura, así como la intensidad lumínica del diodo led disminuye a una pequeña tasa con la temperatura. Los sensores de alto desempeño Licor Li210SA tienen una dependencia máxima

de $\pm 0{,}15\,\%$ por grado ^oC. Si se utilizaran dos para medir la transmitancia directamente como se definió en la Ec. 3.1, para un rango de variación de temperatura de $\Delta T = 20^oC$, implicaría un efecto en la medida de la forma,

$$T_v(\Delta T) = \frac{Il_{interior}[1 \pm 0{,}015(20)]}{Il_{exterior}[1 \pm 0{,}015(20)]} \approx T_v \pm 6\,\% \tag{4.19}$$

Por tanto se podría esperar una variación del $\pm 6\,\%$ unicamente por parte del sensor. Los resultados de la transmitancia medida con el sensor diseñado, se observan en el primer gráfico de la Figura 4.16. Es ilustrado allí que la variación de la transmitancia ante la temperatura es inversamente proporcional, sin embargo la desviación estándar típica respecto a la media $\widetilde{Tvcode} = 192{,}547$ es de $std = 3{,}2286$. Este valor en términos de transmitancia de luz visible aplicando la Ec. 4.4c equivale a $\approx \pm 1\,\%$, lo cual es una variabilidad muy pequeña. Contrario al $6\,\%$ esperado en el peor de los casos, un $1\,\%$ indica que muy probablemente al menos en el rango de $[20 - 40^oC]$ este pequeño porcentaje es causado por la instrumentación y que la dependencia de la transmitancia en estado estable del dispositivo SPD frente a la temperatura es casi inexistente o despreciable.

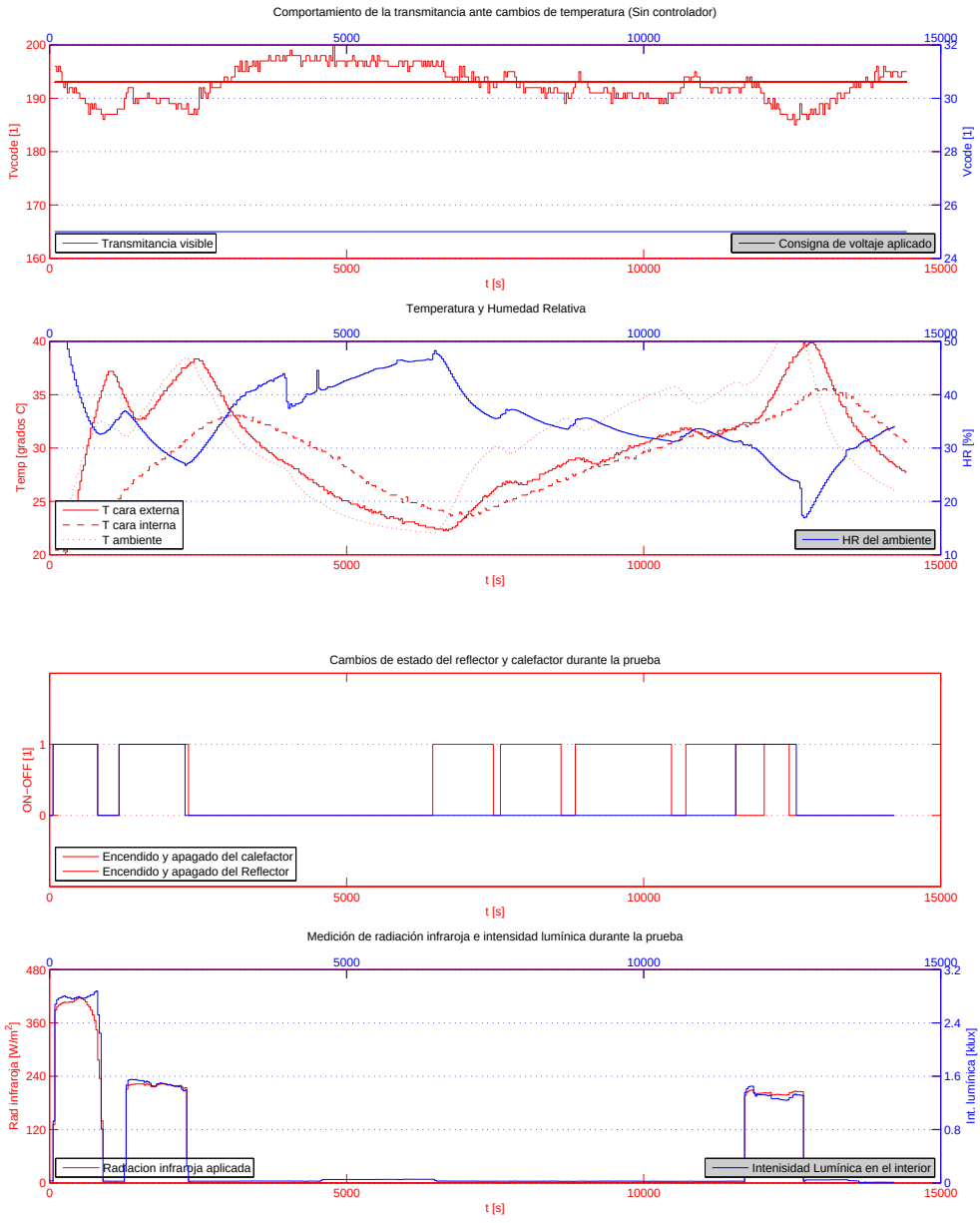


Figura 4.16: Comportamiento del sistema sin control frente a cambios en la temperatura y radiación infraroja aplicada.

Capítulo 5

Control

En primer lugar se define lo que se espera del sistema. Por tanto entre las especificaciones deseadas se tienen las siguientes:

Punto de operación: Al pensar en que un sistema de ventana activa estaría inmerso en un sistema de control automático mas general, el cual definirá el punto de operación dinámicamente de acuerdo a ciertas decisiones tomadas por dicho control, el punto de operación podría ser cualquiera en todo el rango lineal.

Velocidad de respuesta: Se desea que el sistema controlado responda con constantes de tiempo muy similares a las del modelo, es decir, que la dinámica del sistema en lazo cerrado no se haga muy lenta respecto a la del modelo.

Sobrepico: Se desea un sistema sin sobrepico o en su defecto uno muy pequeño, por ejemplo del 1 %.

Error de estado estable: $e_{ss} = 0$. Es importante que el controlador tenga la capacidad de mantener el punto de operación incluso en presencia de perturbaciones externas como la temperatura.

Referente a la elección de un sistema en lazo abierto o cerrado para controlar el dispositivo SPD, las experiencias anteriores juegan un papel muy importante. En [22] fue implementado en un comienzo un sistema de control de ventana de lazo abierto inmerso dentro de un sistema de control general de confort térmico y lumínico. De allí que los resultados de un control de lazo abierto para la ventana no fueron los mas óptimos debido a que no se garantizó un error de estado estable igual a cero, y los tiempos de respuesta eran variables dependiendo de las condiciones del día. Un controlador de lazo cerrado con sensores en las ventanas fue implementado posteriormente. Por tanto se tiene un sistema que está expuesto a

perturbaciones como las características del ambiente, ruidos en los circuitos electrónicos y además una de especial cuidado, típica de sistemas de alimentación directa de la red eléctrica, la cual es la variación en el nivel máximo de voltaje alterno que se tiene en el lugar de instalación, ya que los voltajes de salida del actuador dependen de éste. Por tanto los niveles del voltaje aplicado a la ventana variarán de un lugar a otro típicamente en un rango máximo de $\pm 10\,\%$. Por otra parte, es conocido que parámetros como la ganancia estática y constantes de tiempo del sistema puede cambiar con el tamaño de la ventana [1], esto implicaría ajustar la tabla de ganancias siempre para cada caso particular en el caso de un controlador de lazo abierto. Con referencia a éstas experiencias anteriores, y agregando que solo un sistema realimentado podría garantizar el comportamiento con precisión de sistemas donde existen perturbaciones e incertidumbres acerca del modelo como es el caso, se hace adecuado la implementación de un sistema de control de lazo cerrado.

5.1. Control con realimentación de variables de estado.

Se realizó un diseño de control con realimentación de variables de estado e implementación a través de un observador asintótico basado en lo definido anteriormente dentro de los resultados esperados mediante un procedimiento de diseño ilustrado en [5].

5.1.1. Especificaciones de diseño

Se desea que el sistema en lazo cerrado se aproxime a una respuesta de segundo orden de la forma:

$$G_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \tag{5.1}$$

Cuyos polos estarían ubicados en:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2},\ \text{si } \xi < 1; \tag{5.2a}$$

$$s_{1,2} = -\sigma \pm j(\sigma/\xi)\sqrt{1-\xi^2} \tag{5.2b}$$

[1] 'Esto no pudo ser comprobado debido a que para éste trabajo únicamente pudo ser adquirido un solo tamaño de SPD.'

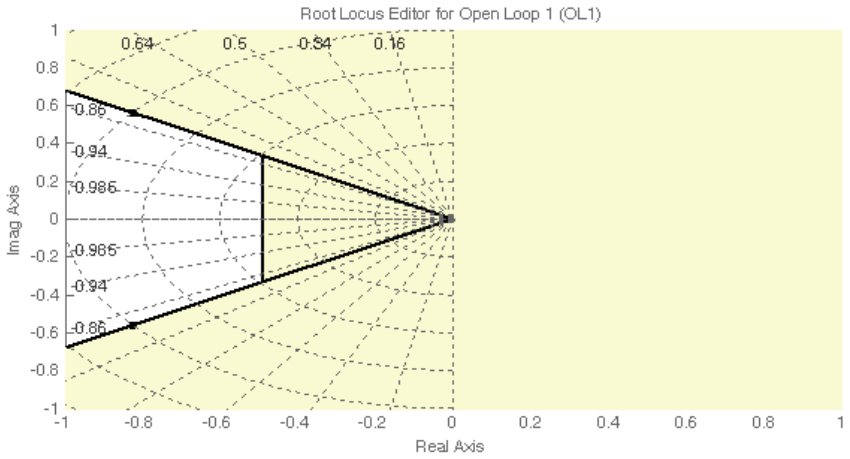


Figura 5.1: Región de diseño en el plano complejo.

Donde ω_n y ξ tomarán un valor sujeto a las siguientes condiciones de diseño:

$$e_{ss} = 0 \tag{5.3a}$$

$$SP_{max} \leq 0{,}01 \tag{5.3b}$$

$$t_{smax} \leq 9s \tag{5.3c}$$

Lo que implica en el plano complejo $s = \sigma + j\omega$

$$\sigma_{min} = \frac{4{,}5}{t_{smax}} = 0{,}5 \tag{5.4a}$$

$$\xi_{min} = \frac{\mid \ln(SP_{max}) \mid}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(SP_{max})}} = 0{,}826 \tag{5.4b}$$

Lo que genera una región de diseño dentro del plano complejo, donde se deben ubicar los polos dominantes de lazo cerrado como la ilustrada en la Figura 5.1.

Por tanto si se escoge $\xi = 0{,}9$ y $\sigma = 1$, entonces $\omega_n = 1{,}111$ por tanto el sistema de la ecuación 5.1

$$G_d(s) = \frac{1{,}235}{s^2 + 2s + 1{,}235} \tag{5.5}$$

y los polos de la ecuación característica serian:

$$s_{1,2} = -1 \pm j0{,}484 \tag{5.6}$$

Los cuales claramente están contenidos dentro de la región de diseño ilustrada en la Figura 5.1.

5.1.2. Modelo de la planta en tiempo continuo.

Del modelo en tiempo discreto hallado en 4.14, es hallado un equivalente de tiempo continuo por medio del método de aproximación por regla trapezoidal conocido como método de *tustin*.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0{,}88311(s - 6{,}702)(s - 6{,}667)}{(s + 7{,}705)(s + 0{,}5244)} \tag{5.7}$$

Es posible observar que dicha función de transferencia presenta dos ceros en el semiplano derecho o ceros no minifase, físicamente se conoce del análisis en 4.3.1 que son producidos por el retardo de transporte de la planta, por tanto si se emplea la aproximación de euler $\tau s + 1 \approx e^{\tau s}$, la función 5.7 puede aproximarse a

$$G(s) = \frac{39{,}4575}{(s + 7{,}705)(s + 0{,}5244)} e^{-0{,}3s} \tag{5.8}$$

Y su representación equivalente en espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0{,}5244 & 1 \\ 0 & -7{,}705 \end{bmatrix}}_{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 8 \end{bmatrix}}_{B} u \tag{5.9a}$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 4{,}932 & 0 \end{bmatrix}}_{C} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{5.9b}$$

En la figura 5.2 se ilustra que la aproximación en tiempo continuo del modelo hallado en tiempo discreto por los metodos de identificación es adecuada.

5.1.3. Realimentación de variables de estado con acción integral.

En 5.9 se tiene una representación de estados de la forma

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{5.10a}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{5.10b}$$

Un controlador por realimentación de variables de estado con acción integral o también conocido como control PI vectorial, adiciona la integral del error como

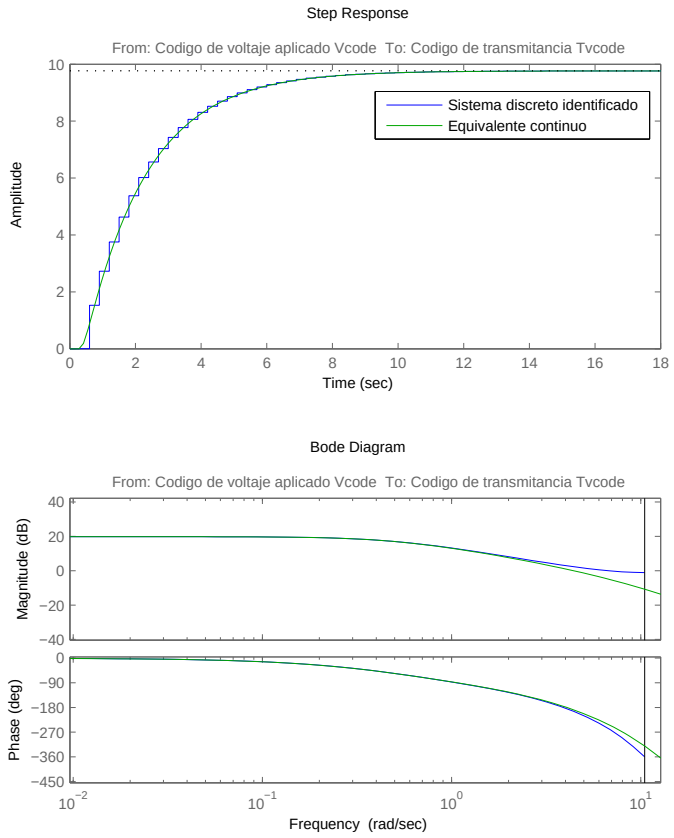


Figura 5.2: Comparación modelo tiempo discreto y aproximación en tiempo continuo.

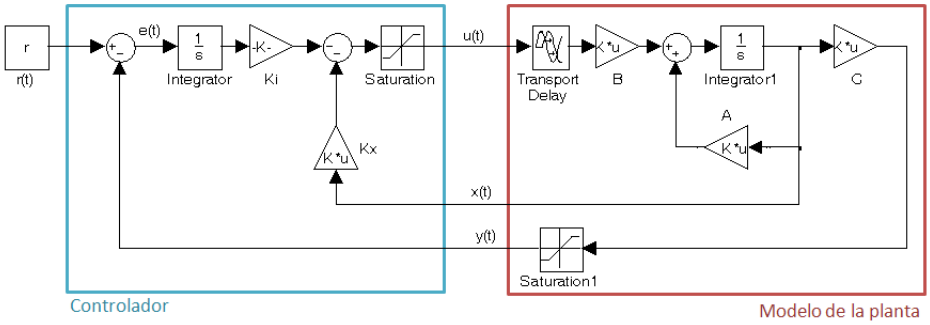


Figura 5.3: Sistema con PI vectorial.

una nueva variable de estado, y por tanto una nueva ecuación de estado se agrega al sistema

$$\dot{\epsilon} = r(t) - y(t) = r(t) - Cx(t) \tag{5.11a}$$

$$\Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\epsilon} \end{bmatrix}}_{\dot{x}_a} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_a} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ \epsilon \end{bmatrix}}_{x_a} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_a} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \tag{5.11b}$$

Lo que genera un sistema de espacio de estados «aumentado» como el de la Ec. 5.11b, donde $r(t)$ representa la referencia o setpoint del sistema. Si la ley de control es una realimentación de estados, entonces seria de la forma

$$u(t) = -K_x x(t) - K_I \epsilon(t) \tag{5.12}$$

donde $K = [K_x \; K_I]$ es la ganancia de realimentación de estados. El sistema en lazo cerrado estaría representado por

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\epsilon} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A - BK_x & -BK_I \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_{lc}} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \tag{5.13a}$$

$$y = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} \tag{5.13b}$$

La representación gráfica del sistema se observa en la Figura 5.3. La ley de control allí realmente está limitada por su respectiva saturación por tanto realmente la ley de control es:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & si\ u < 0 \\ -K_x x(t) - K_I \epsilon(t) & si\ 0 \leq u \leq 36 \\ 36 & si\ u > 36 \end{cases} \tag{5.14}$$

y la salida igualmente es restringida por los valores definidos para T_{vcode} anteriormente,

$$y(t) = \begin{cases} 0 & si\ y < 0 \\ y(t) & si\ 0 \leq y \leq 255 \\ 255 & si\ y > 255 \end{cases} \tag{5.15}$$

Deben elegirse unos valores para el vector K que garantice 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 de la figura 5.1. Con ayuda de Matlab, es posible calcular, el vector de ganancias de realimentación de estados por asignación de polos de dicha matriz. Los polos deseados son los definidos en 5.6 llamados polos dominantes, y uno más, escogido de tal forma que esté lo suficientemente alejado de los dominantes para no afectar demasiado la respuesta deseada.

$$p_{1,2,3} = \begin{cases} -1 + j0{,}484 \\ -1 - j0{,}484 \\ -10 \end{cases} \tag{5.16}$$

$$\Rightarrow K = [K_1 \ \ K_2 \ \ K_I] = [1{,}902 \ \ 0{,}471 \ \ -0{,}312] \tag{5.17}$$

Cálculo de ganancias de ralimentación mediante LQR

Otra forma de calcular el vector de ganancias de realimentación K de forma óptima es calculando un LQR (Linear Quadratic Regulator). Éste diseño se basa en calcular dicho vector de tal forma que se minimice el funcional de costo

$$J = \int_0^\infty (e^T Q e + u^T R u) dt \tag{5.18}$$

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 unas matrices Q y R de tal forma que se diera un gran peso a la entrada con el objetivo de obtener una acción de control suave y mínima, las matrices usadas fueron

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = 200 \tag{5.19}$$

Como se ha demostrado en la teoría acerca del regulador lineal [13] el vector de ganancias de realimentación estaría dado por

$$K = -R^{-1}B_a^T S \tag{5.20}$$

Donde S es una matriz que satisface la ecuación de Ricatti

$$SA_a + A_a^T S + Q - SB_a R^{-1} B_a^T S = 0 \tag{5.21}$$

(A_a y B_a fueron definidos en la Ec. 5.11b). Por tanto, al resolver dicho sistema de ecuaciones algebraicas y obtener la matriz S, es posible calcular el vector de ganancias de realimentación que minimizan el funcional de la ec. 5.18. Usando las herramientas de matlab para resolver dicho sistema hallamos un vector distinto al hallado anteriormente por asignación de polos

$$\Rightarrow K = [K_1 \;\; K_2 \;\; K_I] = [0{,}4735 \;\; 0{,}062 \;\; -0{,}0707] \tag{5.22}$$

Estas ganancias generan unos polos de lazo cerrado

$$p_{1,2,3} = \begin{cases} -0{,}5001 + j0{,}3332 \\ -0{,}5001 - j0{,}3332 \\ -7{,}7255 \end{cases} \tag{5.23}$$

los cuales se encuentran aún dentro de la región de diseño de la Figura 5.1. La elección por este tipo de controlador se justifica posteriormente en la sección 5.1.5 basado en los resultados mostrados en la Figura 5.9.

5.1.4. Implementación del controlador mediante estimación de estados.

Como se observa en la figura 5.3, el controlador necesita conocer el vector de estados, por tanto es necesario diseñar un estimador u observador de estado a partir de la entrada y salida medible de la planta. La representación gráfica de un observador asintótico típico se presenta en la figura 5.4. Dicha representación se rige por la ecuación de estado,

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(Cx - C\hat{x}) \tag{5.24a}$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + LCx \tag{5.24b}$$

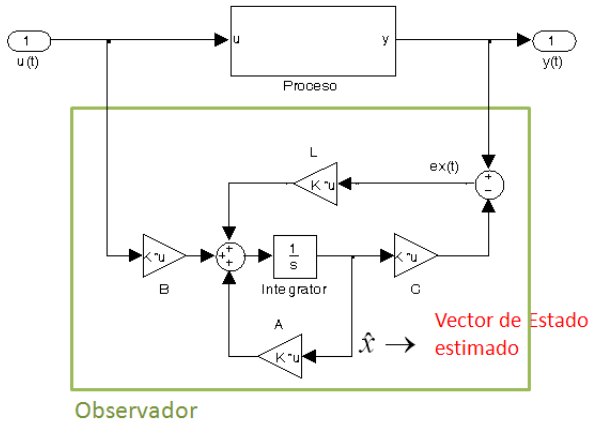


Figura 5.4: Observador de estados asintótico.

Al unir 5.24 con 5.10a se tiene,

$$\frac{d}{dt}(x - \hat{x}) = (A - LC)(x - \hat{x}) \tag{5.25}$$

Por tanto al garantizar que los valores propios de la matriz $A - LC$ los cuales representan los polos de la anterior ecuación, hagan estable la ecuación, el error $(x - \hat{x})$ que representa la diferencia entre los estados reales del proceso y los estimados tenderán a cero. Un criterio frecuentemente usado para escoger los polos del observador es escogerlos 5 veces menores que la parte real de los polos dominantes del control (Ec. 5.23), por tanto al escoger los polos en

$$p_{1,2} = \begin{cases} -3 \\ -5 \end{cases} \tag{5.26}$$

Se calcula el valor de la matriz L con los comandos de asignación de polos en matlab

$$L = \begin{bmatrix} -0{,}0465 \\ 2{,}5804 \end{bmatrix} \tag{5.27}$$

Finalmente el sistema con controlador basado en observador puede ser implementado como en la Figura 5.5 y su resultado comparado frente al sistema ideal de la expresión 5.5 se ilustra en la Figura 5.6.

En la figura 5.7 se ejecuta la simulación del sistema con condiciones iniciales $x(0) = [25; 25]$ con el objetivo de ilustrar como el observador hace que el error se

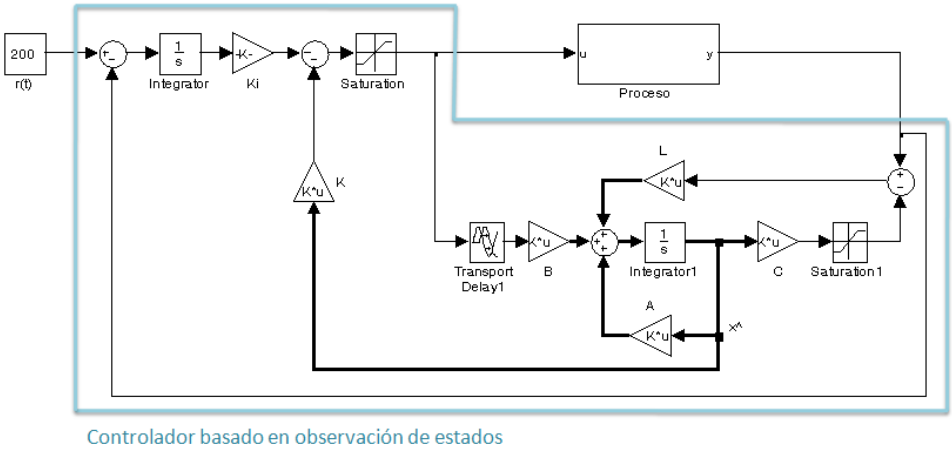


Figura 5.5: Sistema de control basado en observador de estados.

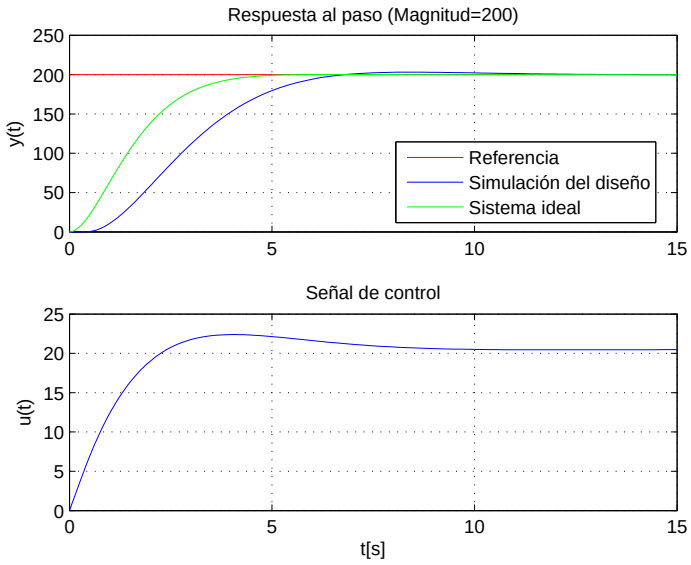


Figura 5.6: Comparación del diseño y el sistema ideal.

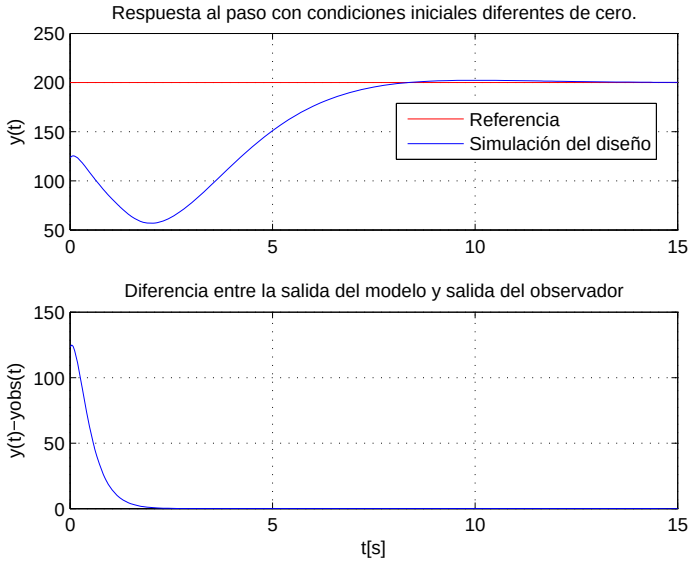


Figura 5.7: Desempeño del observador con condiciones iniciales diferentes de cero

comporte asintóticamente con tendencia a cero con el paso del tiempo. Es posible observar que la salida estimada alcanza la salida real en aproximadamente 1.5 segundos, lo cual es un resultado muy adecuado.

5.1.5. Otras consideraciones prácticas y resultados de simulación del sistema

Tres aspectos modifican la estructura de simulación, tal como se ilustra en la Figura 5.8. En primer lugar la discretización de la señal de control dada por el bloque *zero order hold* o retenedor de orden cero, quien mantiene la señal en un mismo valor durante cada tiempo de muestreo. En segundo lugar la discretización de la señal de control pero de la magnitud, realizada por un comando de redondeo *round*, quien se encarga que la señal de control sea un número entero de $0 - 36$, correspondiente al comando recibido por el driver electrónico. El tercer aspecto corresponde a agregar el modelo discreto hallado en la sección de identificación, el cual modela tanto el comportamiento entrada salida como el comportamiento frente a ruido blanco a la salida, por tanto representa un mayor acercamiento a la realidad. Los resultados frente a la respuesta al paso se muestran en la figura 5.9. Allí es posible observar porque se eligió trabajar con el controlador LQR (color azul) en vez del controlador hallado mediante asignación de polos (color magenta). Aunque este último tiene una respuesta mas rápida y mas acercada al sistema ideal de la expresión 5.5 (color cyan), la señal de control no es la más adecuada,

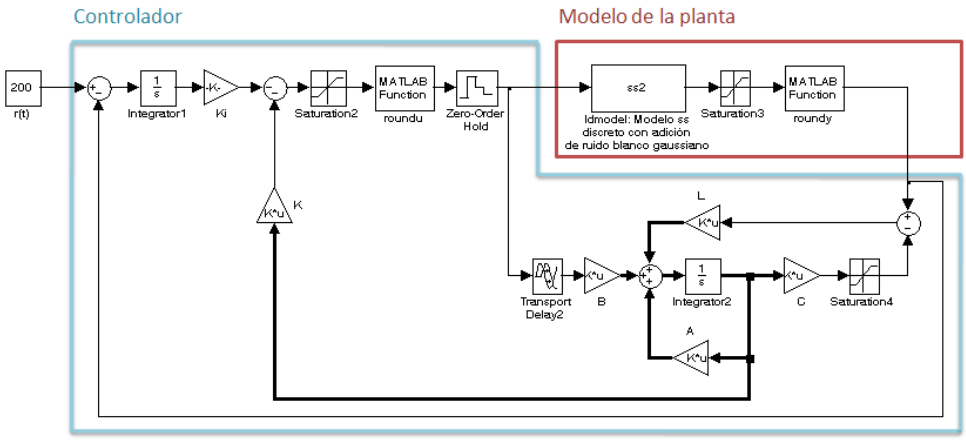


Figura 5.8: Estructura de simulación real del sistema.

mientras que el LQR presenta una muy buena señal de control al haberse hecho énfasis en ésto en la escogencia de las matrices Q y R.

5.1.6. Implementación real del sistema de control con Real Time Workshop y Real Time Windows Target de Matlab.

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. 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 Figura 5.10. Con el primero se reciben las señales de la tarjeta de adquisición de señales y con el segundo se envían las órdenes al driver electrónico del SPD.

En la Figura 5.11 se observan los resultados del sistema real de lazo cerrado trabajando en tiempo real con tiempo de muestreo $T_s = 0{,}3s$. Como se definió en la sección 4.2, el diseño del sistema fue hallado en base a la suposición de linealidad en el rango de $[8 - 50\,\%]$ de transmitancia (Equivalente a $Tvcode = [25 - 155]$). Sin embargo en la Figura 5.11 se aplica un paso de magnitud $Tvcode = 200$, para observar que el sistema trabaja satisfactoriamente fuera de la region lineal de operación. Por esta razón, la respuesta real difiere un poco de la simulada pero se cumplen los objetivos de tiempo y sobrepaso.

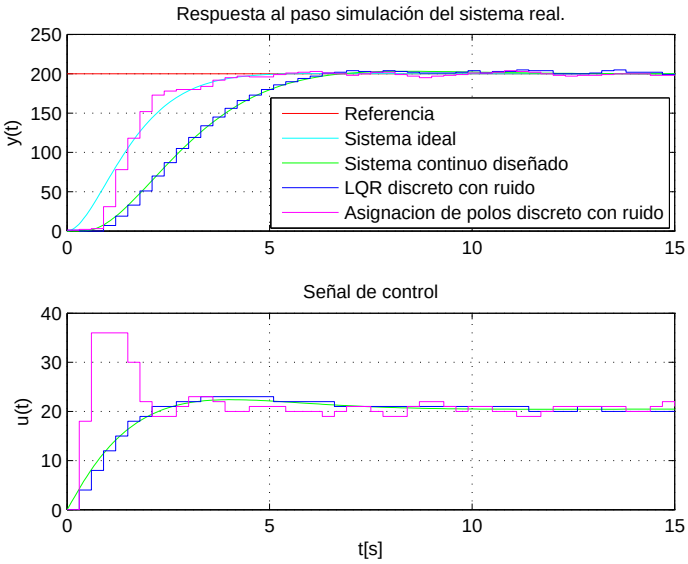


Figura 5.9: Resultado respuesta al paso simulación del sistema completo.

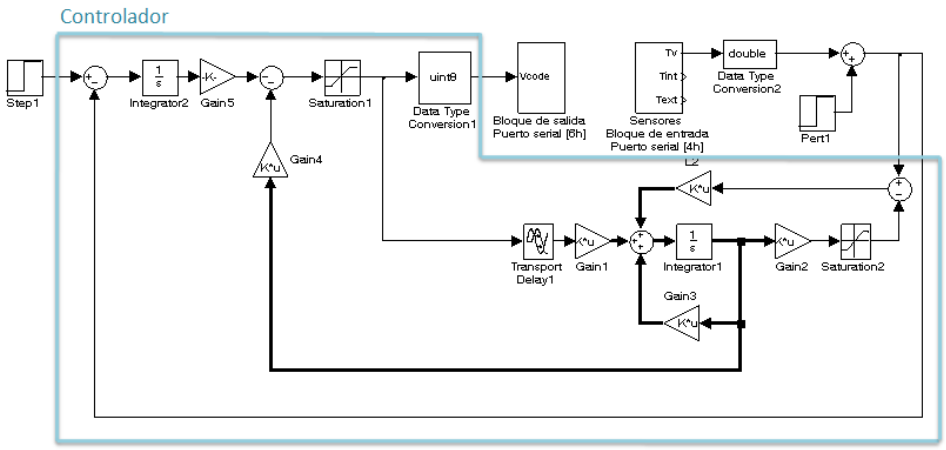


Figura 5.10: Estructura del controlador de la planta física real.

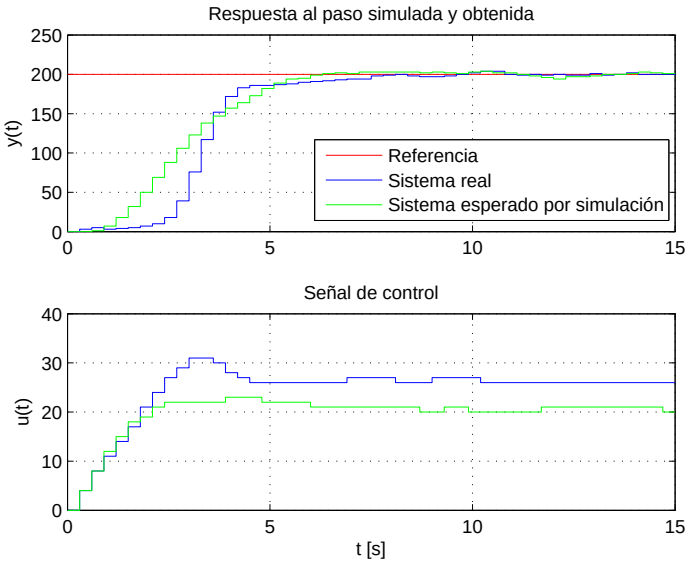


Figura 5.11: Resultados de la respuesta del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a una entrada tipo paso.

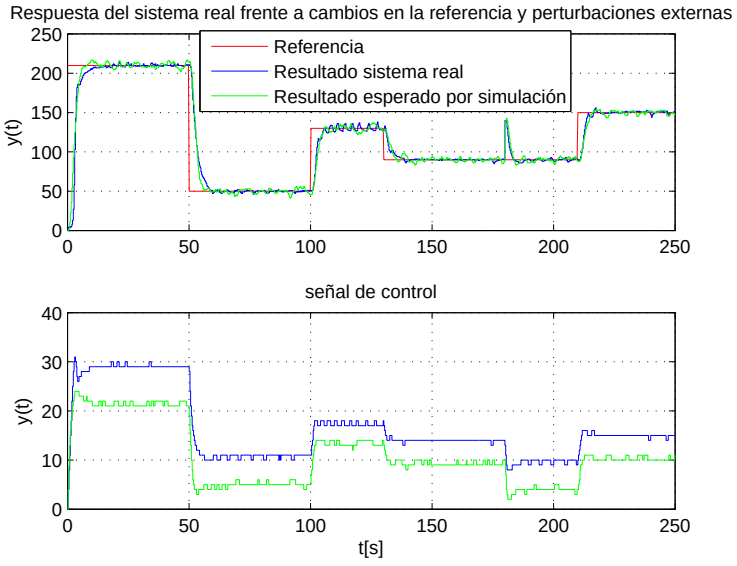


Figura 5.12: Resultados de la respuesta del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a cambios en la referencia y perturbaciones externas.

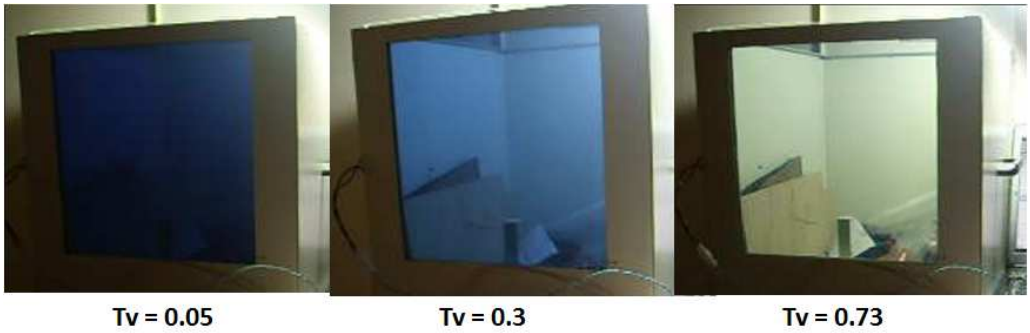


Figura 5.13: Imagen demostrativa del sistema SPD en distintas referencias.

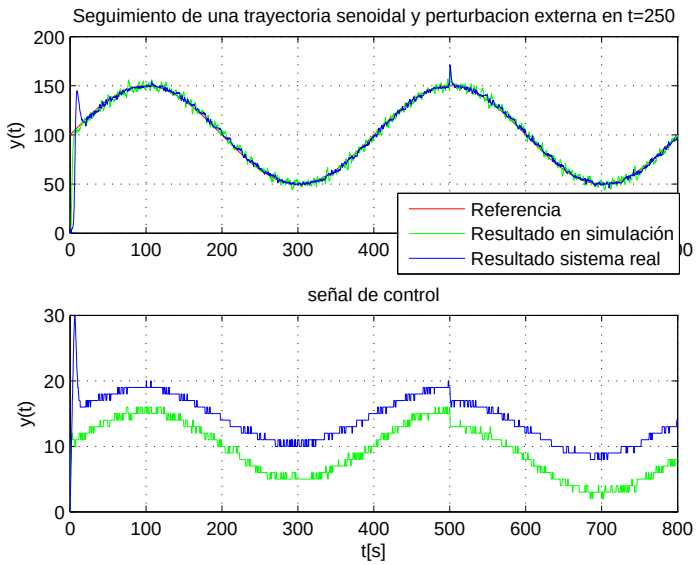


Figura 5.14: Resultados del sistema de lazo cerrado obtenida y esperada frente a una referencia senoidal.

En la Figura 5.12 se ilustran la respuesta del sistema de lazo cerrado frente a cambios en la referencia y perturbaciones externas, tanto para el sistema simulado como para el real. Una perturbación a la salida 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 y ante la perturbación se recupera rápidamente. La Figura 5.13 muestra fotografías del vidrio en diferentes referencias de transmitancia.

La Figura 5.14 corresponde a una prueba de seguimiento de la referencia cuando ésta es una señal senoidal que recorre todo el rango de magnitud posible, igualmente una perturbación es inyectada en t = 250s. Esta prueba indica que éste sistema de ventana puede tener una referencia variable y por tanto puede ser gobernado por un controlador maestro que le indica en cada instante de tiempo el valor de referencia que deberá seguir.

5.2. Cambios de temperatura.

A pesar de lo mostrado en la sección 4.4 referente a la despreciable vulnerabilidad del SPD frente a la temperatura, se desarrolló una prueba similar a la documentada en dicha sección pero ésta vez del sistema en lazo cerrado. Los resultados se muestran en la Figura 5.15. Allí es aplicada una señal de referencia de $Tvcode = 193$ durante un periodo de aproximadamente 2 horas en el que son aplicados cambios en la temperatura, en dicho periodo, el controlador regula la transmitancia alrededor de la referencia con una desviación estándar de $std = 1{,}498$ lo que corresponde a una variabilidad del $\pm 0{,}5\,\%$ de transmitancia alrededor del setpoint.

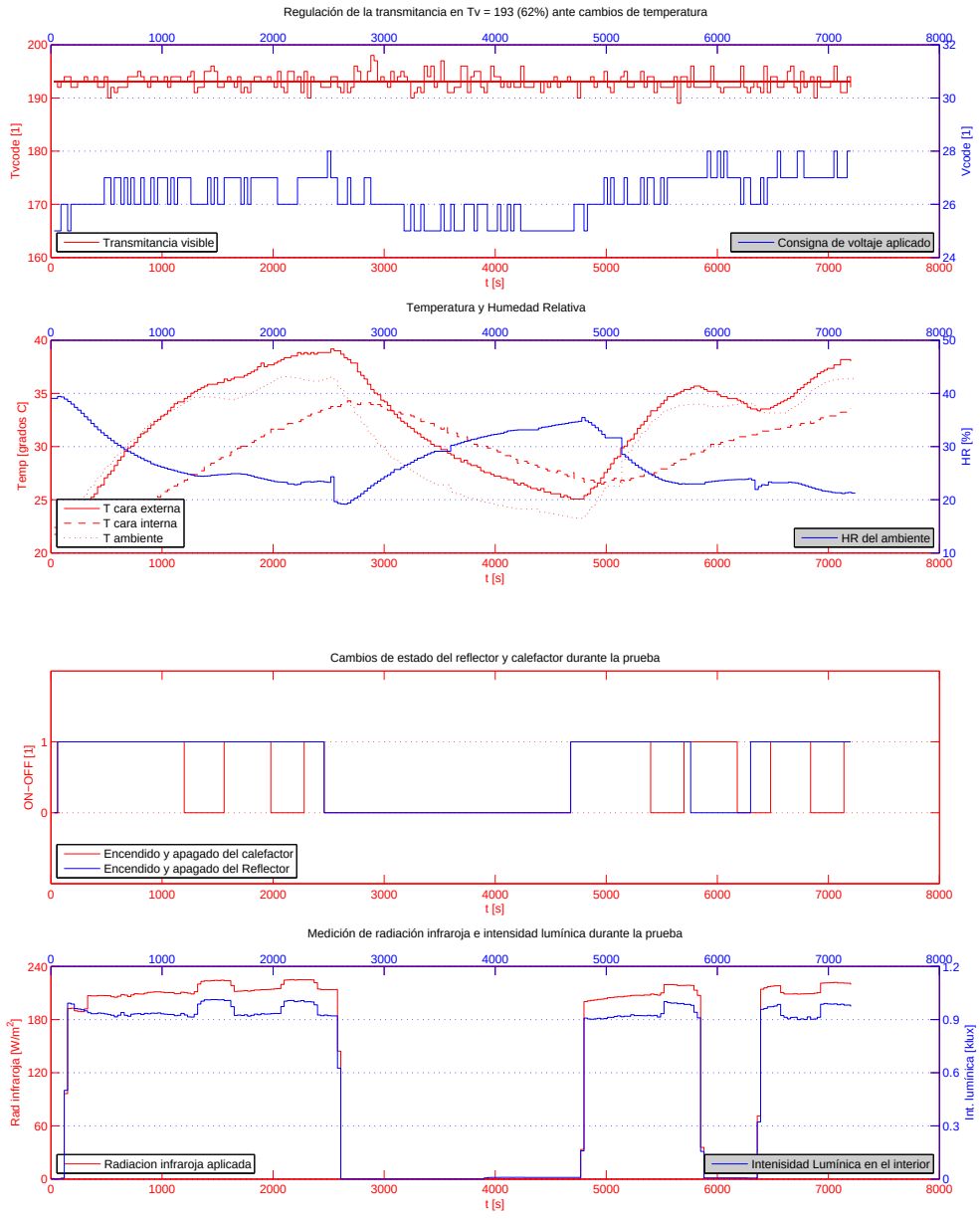


Figura 5.15: Comportamiento del sistema controlado frente a cambios en la temperatura y radiación infraroja aplicada.

Capítulo 6

Conclusiones.

- Con la información presentada sobre la aplicación de materiales cromogénicos en fachadas se dió un primer paso en el grupo de investigación en "Mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética" hacia este tema aplicado a la eficiencia energética en edificios.

- Un análisis comparativo de las diferentes tecnologías disponibles favoreció a los dispositivos de partículas suspendidas o SPDs como la más óptima. Fue comprobado experimentalmente que el dispositivo de partículas suspendidas usado en ventanas, permite una regulación del $1 - 73\,\%$ de la luz visible y del 20-40 % de la luz infraroja 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.

- Los dispositivos SPD, brindan gran flexibilidad y adaptabilidad a la fachada, sin embargo no son garantía como opción óptima para todos los casos. Debido a que el consumo eléctrico del sistema HVAC depende de las condiciones climáticas de cada lugar y de la relación ventana-pared de la fachada y el consumo eléctrico por sistemas automáticos de iluminación de los niveles de iluminación natural según ubicación geográfica y del diseño del lugar, e igualmente de la relación ventana-pared de la fachada, como se registró en la sección 2.1.5, es necesario un estudio preliminar de cada caso particular que tenga en cuenta los pesos de tales variables en el consumo final para elegir la opción óptima que brinde el punto óptimo energético entre distintas tecnologías de ventana.

- Según resultados experimentales registrados en trabajos que hacen parte del estado del arte, 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, como el caso colombiano.

- El hardware diseñado y construido que maneja al SPD tuvo resultados satisfactorios y se cumplió con las especificaciones deseadas. El actuador maneja adecuadamente el vidrio con que se trabajó, 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 consecución, por tanto no se conoce su comportamiento frente a otros tamaños de vidrio. Se esperaría que pierda su carácter de linealidad cuando el tamaño cambia considerablemente, ya que esto seria equivalente a un cambio considerable en el tipo de carga. Sin embargo, es un tema con varias soluciones electrónicas a través de varios métodos disponibles tanto con electrónica análoga o digital y consiste en un regulador de lazo cerrado del voltaje de salida. Este tipo de mejoramiento solo seria posible al experimentar con vidrios de distintos tamaños lo cual se contemplará para trabajos futuros.

- Fue validado satisfactoriamente un sensor de transmitancia de luz visible de bajo costo aplicable a los vidrios de una fachada frente a una medición realizada con sensores de alta gama debidamente certificados y calibrados. El sensor tiene sincronía espectral con lo que es conocido como luz visible para el ojo humano. Este sensor permite realizar un control de lazo cerrado sobre las ventanas para garantizar la presición de dicha variable independiente de perturbaciones tales como el cambio en los niveles de voltaje de la red eléctrica, condiciones ambientales externas y pequeños cambios en la ganancia de lazo abierto del dispositivo que pudieran ocurrir con el tiempo.

- El SPD no es afectado considerablemente por la temperatura, las pruebas de exposición del SPD ante un rango de temperatura de $20 - 40^oC$ 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 piensa que ésta variación se debe a ellos y no al SPD.

- Contrario a lo encontrado en la hoja de datos del fabricante y a lo registrado en la literatura, los cuales registran el tiempo de conmutación en el orden de 1 segundo, se comprobó experimentalmente que el dispositivo SPD tiene tiempos de asentamiento o tiempos de conmutación por del orden de los 8 segundos. Por otra parte, un modelo de segundo orden fué el más adecuado para representar su dinámica, luego de un amplio proceso de validación.

- El sistema de control diseñado tuvo resultados satisfactorios, 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 variable satisfactoriamente y está listo para ser gobernado en el futuro 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.

6.1. Trabajos futuros.

- Un primer trabajo para culminar finalmente lo referente al control de un dispositivo SPD es traducir el algoritmo de control diseñado y ejecutado en Matlab, a un dispositivo en hardware y de esta forma no depender de un PC para este tipo de lazo de control. Sería interesante usar un PC posteriormente para monitorear y configurar mas no para controlar.

- Luego de obtener un sistema embebido, es posible usar el sistema completo como un actuador confiable para un sistema multivariable integral más general. Un sistema con sensores de Temperatura, Humedad Relativa y nivel de iluminación que decida óptimamente la referencia en todo instante de tiempo para los sistemas de ventana, HVAC e iluminación dimerizable y de ésta forma mantener dichas variables dentro de rangos de confort al mínimo costo energético, sería el enfoque más interesante para los trabajos futuros.

- El prototipo construido permite realizar pruebas similares a las realizadas en este trabajo tanto para otras tecnologías activas como *Electrochromics*, Cristal Liquido, *Thermochromics*, etc. o pasivas, o combinaciones entre ellas. Sería muy interesante generar una metodología de pruebas para comparar los beneficios energéticos de cada una, dependiendo de las condiciones climáticas de distintos lugares.

- Un prototipo a escalas reales con incidencia de luz solar directa podría realizarse para ejecutar pruebas y mediciones en intervalos de tiempo grandes (días o meses) aprovechando la consecución de equipos e instrumentación que se realizó a través de éste proyecto.

Nomenclatura

$e(t)$ Error:

$\vec{E}$ Campo Eléctrico

$\vec{F}$ Fuerza.

Hz *Hertz.*

$Il_{exterior}$ *Nivel de iluminación exterior.*

$Il_{interior}$ *Nivel de iluminación interior.* K Constante o ganancia.

L Retardo de transporte.

q Carga

$r(t)$ Referencia

τ Constante de tiempo.

T_v Transmitancia de luz visible.

T_{vref} Referencia de transmitancia de luz visible.

T_{vcode} Código de transmitancia de luz visible.

u Señal de Entrada.

V_{code} Código de voltaje.

V_{rms} *Root Mean Square Voltage* Voltaje eficaz.

ω Frecuencia angular.

W Watts.

Wh Watts-hora.

x Variable de Estado.

$\dot{x}$ Derivada de la variable de estado.

$\hat{x}$ Variable de Estado aumentado.

y Salida.

y_e Salida estimada.

Z Impedancia.

Lista de Acrónimos

AC *Alternating Current* - Corriente Alterna.

CIE *Commission Internationale de L'eclairage* - Comisión Internacional de iluminación.

DC *Direct Current* - Corriente Directa.

EC *Electrochromics*.

HVAC *Heating, Ventilation and Air Conditioning* - Calefacción, ventilación y aire acondicionado.

ICSP *In-Circuit Serial Programming* - Programación serial dentro del circuito.

ITO *Indium Tin Oxide* - Oxido de indio dopado con estaño.

LQR *Linear Quadratic Regulator* - Regulador Lineal cuadrático

PC *Personal Computer* - Computador Personal.

PI *Proportional-Integral* - Proporcional-Integral.

RC *Resistor-Capacitor* - Resistencia-Capacitancia.

RS232 *Recommended Standard 232* - Estándar Recomendado 232.

RVP Relación Ventana-Pared

SHGC *Solar Heat Gain Coefficient* - Coeficiente de ganancia de calor solar.

SPD *Suspended Particle Devices* - Dispositivos de partículas suspendidas.

TC *Transparent Conductor* - Conductor Transparente.

Bibliografía

[1] Holographic materials and images http://www.depts.drew.edu/phys/ research/projdetails.html. January 2000.

[2] Reversible photochromic, http://www.colorchange.com/photochromics2002.

[3] A. Azens, E. Avendano, J. Backholm, L. Berggren, G. Gustavsson, R. Karmhag, G.A. Niklasson, A. Roos, and C.G. Granqvist. Flexible foils with electrochromic coatings: science, technology and applications. *Materials Science and Engineering B*, 119:214–223, June 2005.

[4] J. M. Bell, J. P. Matthews, and I. L. Skryabin. Modelling switching of electrochromic devices–a route to successful large area device design. *Solid State Ionics*, 152-153:853–860, December 2002.

[5] H. Diaz. *Fundamentos de control*.

[6] Fairchild. Application note an-3005 design fundamentals for phototransistor circuits. Application note an-3005, Fairchild Semiconductor Corporation, 2002.

[7] F. Gugliermetti and F. Bisegna. Daylighting with external shading devices: design and simulation algorithms. *Building and Environment*, 41:136–149, February 2006.

[8] Maria Elena López Guillén. Identificación de sistemmas. aplicación al modelado de un motor de continua.

[9] SAGE Electrochromics Inc. Technology - how it works http://www.sage-ec.com/pages/howworks.html.

[10] P.A.B. James and A.S. Bahaj. Smart glazing solutions to glare and solar gain: a 'sick building' case study. *Energy and Buildings*, 37:1058–1067, October 2005.

[11] Pierre Vezin Jean-Francois Thomas. Optical cell control system, 1998.

[12] J. Karlsson. Control system and energy saving potential for switchable windows. *Proceedings of Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*, pages 199–206, 2001.

[13] D. Kirk. *Optimal Control Theory: An introduction*. Prentice Hall, 1970.

[14] J. H. Klems. Advancement of electrochromic windows thermal calibration of the windows testbed facility.

[15] Janez Krc, Marko Topic, Franc Smole, Ursa Opara Krasovec, Urska Lavrencic Stangar, and Boris Orel. Three-state regulator for electrochromic windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 71:387–395, February 2002.

[16] J.F. Kreider and A. Rabl. *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency*. McGraw-Hill, 1994.

[17] Ziva Kristl, Mitja Kosir, Mateja Trobec Lah, and Ales Krainer. Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building. *Renewable Energy*, In Press, Corrected Proof, 2007.

[18] Carl M. Lampert. Optical switching technology for glazings. *Thin Solid Films*, 236:6–13, December 1993.

[19] Carl M. Lampert. Smart switchable glazing for solar energy and daylight control. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 52:207–221, April 1998.

[20] Carl M. Lampert. Chromogenic smart materials. *Materials Today*, 7:28–35, March 2004.

[21] CM Larnpert. Chromogenic switchable glazing: Towards the development of the smart window. 1995.

[22] E. Lee. Advancement of electrochromics windows. Final project report, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2006.

[23] E.S. Lee, D.L. DiBartolomeo, and S.E. Selkowitz. Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: Field study results. *Energy and Buildings*, 38:30–44, 2006.

[24] Lennart Ljung. *System Identification: Theory for the user*. Prentice Hall, 1987.

[25] Albert P. Malvino. Method and device for controlling voltage provided to a suspended particle device, May 2005.

[26] Albert P. Malvino. Methods and circuits for distributing power to spd loads, August 2008.

[27] IES Illuminating Engineering Society of North America. *The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application.* Publications Department IESNA, 9a edition, 2000.

[28] Alexandra Raicu, Helen Rose Wilson, Peter Nitz, Werner Platzer, Volker Wittwer, and Ekkehard Jahns. Facade systems with variable solar control using thermotropic polymer blends. *Solar Energy*, 72:31–42, 2002.

[29] Steven E. Selkowitz, Michael Rubin, E. S. Lee, and R. Sullivan. Review of electrochromic window performance factors. *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII*, 2255(1):226–248, 1994.

[30] Inc. SPD Systems. Vectorlux spd laminated panel technical specifications. Technical report, SPD Systems Inc, 2007.

[31] M. Selkowitz S. Sullivan, R. Rubin. The energy performance of electrochromic windows in heating-dominated geographic locations. *Proceedings of SPIE International Symposium on optical materials technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XV*, 1996.

[32] R. Sullivan, M. Rubin, and S. Selkowitz. Reducing residential cooling requirements through the use of electrochromic windows. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI Conference, Clearwater Beach, USA*, 1995.

[33] R. Sullivan, M. Rubin, and S. Selkowitz. Energy performance analysis of prototype electrochromic windows. *ASHRAE Transactions*, 103(2):149–156, 1997.

[34] Teccor. Application note 1003: Phase control using thyristors. Technical report, Teccor Electronics.

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

[36] F.C. Winkelmann. Modeling windows in energyplus. *Proc. IBPSA, Building Simulation*, 2001.