



ELSEVIER



CrossMark

ScienceDirect

Disponible en www.sciencedirect.com



RIAI

Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13 (2016) 421–429

www.elsevier.es/RIAI

Desarrollo de un Sistema de Iluminación Artificial Inteligente para Cultivos Protegidos

Basil Mohammed Al-Hadithi^{*a,b}, Cecilia E. García Cena^{a,b}, Raquel Cedazo León^a, Carlos Loor Loor^a

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ronda de Valencia, 3 28012. Madrid. España.

^bCentro de Automática y Robótica. Universidad Politécnica de Madrid-CSIC-UPM, C/José Gutiérrez Abascal, n°2, 28006, Madrid, España.

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo hardware y software de un sistema de iluminación artificial para cultivos protegidos. El sistema consta de un conjunto de lámparas, circuitos de control de potencia y un sensor de intensidad lumínica, que junto al software desarrollado en LabVIEW®, permiten llevar a cabo el control sobre la cantidad de energía irradiada durante todo el proceso de cultivo teniendo en consideración la forma en que esta energía se distribuye en cada fotoperiodo. Todo este proceso de control se realiza en un ordenador el cual se comunica con un dispositivo Arduino MEGA que cumple la función de tarjeta de adquisición de datos. Para programar el funcionamiento del sistema de control se diseña una interfaz que facilita al usuario la introducción de parámetros y la visualización de información del funcionamiento del sistema. Además, permite seleccionar la estrategia de control con el que se desea controlar el sistema pudiendo elegir entre un control predictivo o un control PD. Ambos algoritmos hacen uso de un modelo matemático de las lámparas el cual se encarga de transformar las señales generadas por los controladores en señales digitales que gobiernan el funcionamiento de la electrónica implementada. Finalmente, se analizan los resultados experimentales obtenidos en diversas pruebas realizadas haciendo uso de ambos algoritmos de control comparando los beneficios e inconvenientes de cada controlador.

Palabras Clave:

Modelado, control predictivo, controlador PD, herramientas software, interfaces de ordenador.

1. Introducción

Los cambios climáticos causan grandes pérdidas económicas en el sistema tradicional de cultivo, lo cual ha generado un creciente uso de sistemas de cultivo protegidos y el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de lámparas LED (*Light Emitting Diode*) para procesos relacionados a la agricultura tal como muestra en (Wang 2012).

Los sistemas de invernadero presentan la ventaja de permitir controlar el clima interior para optimizar el crecimiento del cultivo protegiéndolos de las inclemencias del tiempo. Sin embargo, el control de estos sistemas es complejo debido, fundamentalmente, a que son procesos físico-químicos multivariados (Martínez, et al. 2005).

Debido a la gran influencia que tiene en estos procesos las condiciones climatológicas de la región, es estrictamente necesario generar estrategias de control que se adapten a las particularidades del entorno.

La tendencia actual va más allá del sólo hecho de controlar la temperatura y humedad del sistema sino que, por el contrario, se desea controlar tanto el clima interior como aquellas variables

físicas del cultivo, llegando a hacerse un control de crecimiento, plagas, etc.

En cuanto a la energía lumínica necesaria para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, el desarrollo de controladores se ha enfocado en la implementación de iluminación artificial para compensar la luz proveniente del sol, ya sea con el fin de modificar los fotoperiodos para acortar los tiempos de cultivo o simplemente compensar el flujo radiante recibido el cual es atenuado debido a la estructura de los invernaderos (Fernández Díaz 2011).

En (Li 2011) se analiza la relación que existe entre la intensidad de luz a la que es expuesta una planta y su capacidad para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. Los autores analizan cuatro especies diferentes (hojas de soya, arroz, maíz y banabá) y debido a que los resultados de crecimiento han sido similares, proponen una única función de crecimiento en función de la intensidad lumínica.

Esta función está representada por un conjunto de ecuaciones que dividen el estudio en 4 regiones. En la primera de ellas la actividad fotosintética se ve incrementada de manera lineal y crece con gran velocidad, hasta alcanzar una zona (segunda región) en donde las plantas dejan de responder linealmente y sufre un proceso de desaceleración. La tercera región supone una zona donde es alcanzada la capacidad máxima que posee la planta para realizar fotosíntesis por lo cual incrementar la intensidad de

*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: basil@etsii.upm.es (Basil M. Al Hadithi), cecilia.garcia@upm.es (Cecilia E. García Cena), basil.alhadithi@upm.es (Basil M. Al Hadithi)

luz solo supone un gasto energético innecesario, incluso puede llegar a disminuir la capacidad de fotosíntesis de la planta (cuarta región), ya que ésta no puede absorber de manera eficaz la luz recibida debido a un fenómeno denominado estrés por luz intensa (highlight stress).

Otra propiedad de la luz que influye en el proceso de fotosíntesis es la longitud de onda de la fuente empleada. En (Yuanping, et al., 2012) se desarrolla una investigación sobre la influencia de distintas combinaciones de luces LEDs sobre cultivos de fresas, para ello se lleva a cabo cuatro configuraciones de LEDs bajo distintas combinaciones de longitudes de onda y de potencia lumínica así como una muestra de control. La investigación dio como resultado que una proporción de cinco LEDs rojos por uno azul fue la mejor combinación, ya que estos colores maximizan la producción de diferentes tipos de clorofila. Sin embargo, el uso de la tecnología LED no genera calor suficiente como lo haría la radiación solar, ésta última guarda estrecha relación junto a otros factores en la temperatura interior del invernadero, tal como expone (Balas 2008), lo cual en parte podría facilitar su control mediante otras fuentes de calor.

El avance de la tecnología ha permitido tener mayor control sobre el funcionamiento de los invernaderos, existen herramientas que permiten simular la cantidad de luz que percibirá la planta en función de las fuentes de luz empleadas y de su ubicación tal como expone (Gerhard, et al., 2009) en su investigación.

En (Guzman et al., 2005) se enfatiza el hecho que la interfaz gráfica facilita la comprensión del modelo del invernadero. Sus autores desarrollaron una interfaz en Matlab-Simulink® que permite visualizar en tiempo real la evolución de las variables del sistema así como el estado de los actuadores con el fin de facilitar el estudio de cultivos de invernaderos.

Es bien sabido que MatLab® es una herramienta potente para el desarrollo e implementación de algoritmos e interfaces de control, sin embargo no es la única. En este sentido, LabVIEW® se presenta como una sólida alternativa a MatLab®. Por citar algún ejemplo, en (Guofang et al., 2010) se muestra un claro ejemplo de las ventajas de su uso, el cual facilita la creación de instrumentación virtual así como el manejo de bases de datos para mantener registro del funcionamiento del sistema de control de un invernadero.

En cuanto a los métodos de control empleados existen diferentes técnicas que van desde simples circuitos de control que conmutan el estado de lámparas en función de las lecturas de los sensores de intensidad lumínica (Fernandez Diaz 2011) hasta circuitos más complejos que involucran un algoritmo de control más avanzado como puede ser el control difuso (Huang et al., 2010) para el control de más de una lámpara.

Sin embargo, a pesar de toda la tecnología al servicio, pocos o ningún sistema de control implementado a la fecha presta mayor importancia a la forma de distribución de la energía artificial en cada fotoperiodo.

Es por ello que en este artículo se propone el desarrollo de un sistema de control de iluminación de invernadero que regule la distribución de energía en cada fotoperiodo en forma de una campana gaussiana usando dos metodologías de control: predictiva (Camacho et al., 2004), (Maciejowski 2002), (Mayne, et al. 2000) y (Rawlings et al., 2009) y PD. Se presenta además la interfaz de usuario y control desarrollada bajo LabView como así también el desarrollo hardware del sistema de control basado en componentes comerciales.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 1 se hace una breve descripción del estado del arte. La

Sección 2 describe el prototipo del invernadero construido y sus sistemas más relevantes (Loor Loor 2013). La Sección 3 describe en detalle el hardware empleado para el sistema de iluminación basado en componentes comerciales, mientras que el software de control se presenta en la Sección 4. En la Sección 5 se describe el modelo matemático y los algoritmos de control implementados, mientras que la Sección 6 presenta los resultados experimentales obtenidos. Finalmente, en la Sección 7, se exponen las conclusiones de este trabajo.

2. Descripción del Prototipo de Laboratorio.

En la Figura 1 se muestra una fotografía del prototipo de invernadero SIGrAL (*Smart Indoor Green house with Artificial Lighting*) construido en el Laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de Universidad Politécnica de Madrid, España. A continuación se realiza una breve descripción del sistema.



Figura 1. Vista frontal del Invernadero SiGrAL (*Smart Indoor Greenhouse with Artificial Lighting*)

2.1 Estructura exterior y cubierta

En el primer prototipo de invernadero del laboratorio se pretende controlar la humedad y la temperatura del clima del mismo para cultivar orquídeas. La cubierta del invernadero es de tereftalato de polietileno conocido comercialmente como Mylar, cuya característica principal es que tiene un alto índice de reflexión y unos pequeños índices de absorción y transmisión por lo que, según el fabricante, refleja hasta un 85% de la luz interior del invernadero.

El sistema de iluminación, es la única fuente de luz y calor interior del invernadero; por lo que es necesario que el material de recubrimiento contribuya a minimizar las pérdidas de calor y el Mylar es el mejor material dada la relación calidad/precio.

El invernadero SIGrAL está construido sobre una estructura de metal de 1780mm×1000mm×500mm, de todo este volumen en la parte inferior se dejó una altura de 100 mm, para el sistema de drenaje del agua del área de cultivo. Además hay un volumen para alojar la tierra de cultivo de 230 mm de alto. Por lo tanto el volumen útil de cultivo se reduce a 1300 mm de alto, por último

en la parte superior para alojar el sistema de control de las lámparas 150 mm.

La tierra de cultivo se aloja en una estructura cilíndrica rectangular de madera con bordes metálicos en la parte superior para darle rigidez, entre la madera y la tierra se acopló un material plástico con el fin de preservar la madera de la humedad producida por el riego, por otro lado, para un buen drenaje en el fondo de la estructura de madera se colocó una capa de arlita.

2.2 Sistema de Iluminación

En la parte superior se encuentra la electrónica de control del sistema de iluminación. Este sistema consta de una lámpara LED de luz roja y azul de 90 W y cuatro bombillas halógenas de 70 W cada una. En la Sección 3 se realiza una descripción detallada del sistema de iluminación del invernadero.

2.3 Sistema de Ventilación

Para el control de la humedad y la temperatura dentro de SIGrAL se cuenta con dos sistemas, el primero son dos ventiladores, uno de ellos actuando como extractor. Este sistema permitirá variar la temperatura y humedad con la introducción de aire del exterior por un lado y sacar el aire más caliente del interior por otro lado, afectando en mayor medida a la temperatura del interior.

2.4 Sistema de Riego

Para garantizar la humedad del suelo y de las plantas se dispone de una bomba universal de 5 W 230 V y un caudal de 300 l/h conectada a una pequeña red de tuberías y esta a su vez conectada a goteros distribuidos uno en cada planta y 4 en el área de cultivo.

3. Sistema de Iluminación del Prototipo de Laboratorio

Los elementos del sistema de iluminación se encuentran alojados en la parte superior o techo del invernadero mientras que la electrónica de potencia, de control y de comunicación está separada físicamente del espacio de cultivo para protegerla de la humedad interior.

Todos los sistemas que se van a describir a continuación se han desarrollado basándose en la plataforma de electrónica abierta Arduino y, más concretamente, utilizando el modelo MEGA 2560.

El sistema de iluminación consta de un conjunto de 4 lámparas de halógeno y una lámpara LED de 90W que funcionarán como fuente de iluminación artificial complementaria. Por último, en la parte inferior a 62 cm de las luminarias se ubica un sensor de intensidad lumínica OPT101 de Texas Instruments el cual fue calibrado empleando la ley inversa de los cuadrados que estipula que la iluminancia sobre una superficie varía inversamente proporcional a la distancia que la separa de la fuente de luz (Valero Muñoz 2011).

El hardware de control de potencia dispone de un conjunto de circuitos eléctricos que cumplen funciones específicas. Dichos circuitos fueron diseñados mediante el software de simulación Quite Universal Circuit Simulator y la herramienta de diseño Eagle. El primero de ellos permitió conocer el comportamiento que tendría la alimentación de las lámparas en las cuales se

intenta regular el valor eficaz de la señal (RMS) mediante la variación de una resistencia. Con la simulación se pudo determinar los componentes electrónicos a emplear en su fabricación. En la Figura 2 se puede observar el resultado de la simulación realizada para dicho circuito.

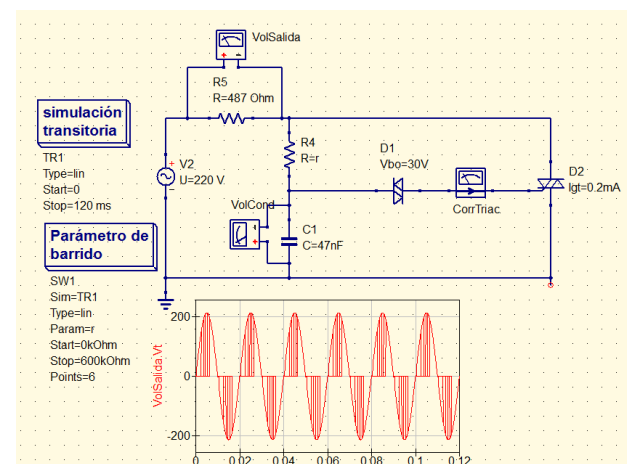


Figura 2: Simulación del circuito de potencia

Todos estos elementos fueron integrados sobre una placa de metacrilato como se observa en la Figura 3 la cual se encuentra suspendida sobre unos tacos de goma para evitar el riesgo de descarga eléctrica.

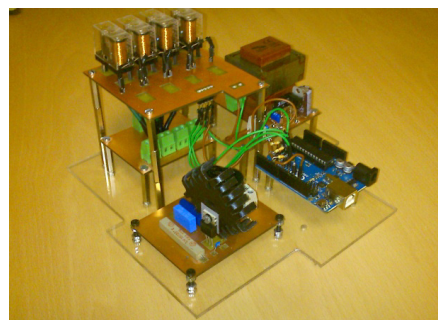


Figura 3: Fotografía de la electrónica desarrollada.

Existen dos circuitos de control de potencia. El primero de ellos regula la intensidad de dos bombillas de halógeno, mientras que el resto de las luminarias disponen de otro circuito que controla únicamente su encendido mediante relés. Ambos funcionan a modo de amplificadores de señal, ya que la orden de encendido y el nivel de intensidad de las lámparas regulables vienen dadas por un dispositivo Arduino MEGA, además de realizar la adquisición de todos los datos y señales para el control del sistema de iluminación (en la Sección 4 se describe en detalle la arquitectura software). La Figura 4 muestra la arquitectura del hardware de control.

El circuito encargado de regular la intensidad lumínica funciona con el mismo principio que los reguladores de luz presentes en los hogares hoy en día, los cuales poseen un potenciómetro en forma de perilla que al girar permiten variar la intensidad de la luz de la habitación modificando el tiempo de carga de un condensador y con ello la frecuencia de disparo de un TriacBT136 que regula el paso de la corriente por las lámparas. No obstante fue necesario sustituir el potenciómetro por un

dispositivo que permitiese su regulación mediante una señal PWM, por ello fue diseñado e impreso mediante una impresora de prototipado 3D una estructura que permite aislar de la luz ambiental una resistencia variable (LDR) y a su vez permite encapsular un diodo LED alimentado con la señal del Arduino (Figura 5).

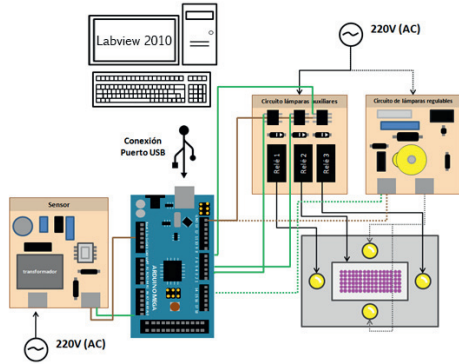


Figura 4: Arquitectura Hardware de control

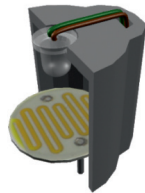


Figura 5: Diseño CAD de la estructura aislante LDR

En la Figura 6 se muestra el esquema del circuito electrónico implementado para el control de la intensidad lumínica cuya finalidad en conjunto es modificar el valor eficaz de la señal de alimentación de las lámparas, denominado comúnmente en electrónica por sus siglas RMS (Root Mean Square) consiguiendo con ello regular la intensidad de la luz.

Por su parte el circuito de encendido y apagado de lámparas se encuentra formado por un grupo de relés que trabajan con una tensión de 5 voltios DC, en sus contactos disponen de una serie de diodos conectados en paralelo para proteger al resto del circuito de corrientes que pudieran ser generadas en las bobinas al dejar de alimentar cada relé. Otro elemento presente en el circuito es un conjunto de opto acopladores 4N25 los cuales permiten aislar las señales de control del Arduino con la fuente de alimentación que acciona los relés. Dicha fuente fue diseñada con una capacidad de consumo de 1 amperio, suficiente para los requerimientos de consumo a máxima capacidad del circuito en el cual todos los relés se encuentra accionados con un consumo aproximado de 200mA, cada uno.

Para el diseño de la fuente de alimentación complementaria fue empleado un transformador de nueve voltios, a su salida fue acoplado un rectificador de señal (Puente de Graetz) el cual modifica la forma de la onda evitando el cambio de sentido del flujo de la corriente. Para eliminar la fluctuación de la señal propias de la onda senoidal con la cual es alimentado el circuito se emplean dos condensadores de 0.33 y 0.1 μF junto a un regulador LM7805, los cuales eliminan el rizado y las caídas de tensión de la señal para obtener una fuente continua.

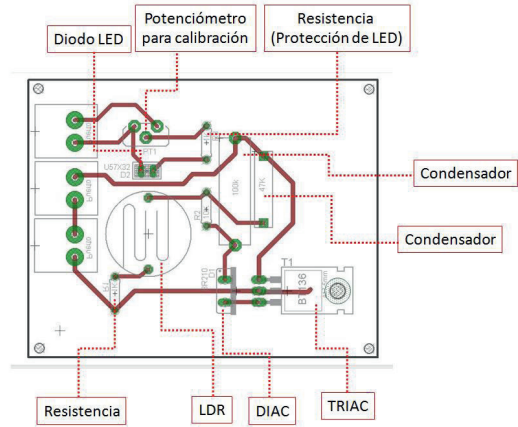


Figura 6: Circuito de Regulación de Intensidad Lumínica

4. Arquitectura Software - Interfaz de Usuario

Como se ha comentado previamente, todo el desarrollo del sistema en la parte hardware se lleva a cabo haciendo uso del microcontrolador Arduino, mientras que en la parte software para implementar los sistemas de control se utiliza el software LabVIEW® de National Instruments en su versión 2010. Este software nos permite crear instrumentación virtual a medida creando interfaces gráficas de usuario con las que se puede controlar el hardware seleccionado, analizar los datos adquiridos y visualizar los resultados, entre otras características.

La aplicación se ha diseñado partiendo de unos requisitos que quedan reflejados en el diagrama de casos de uso de la Figura 7.

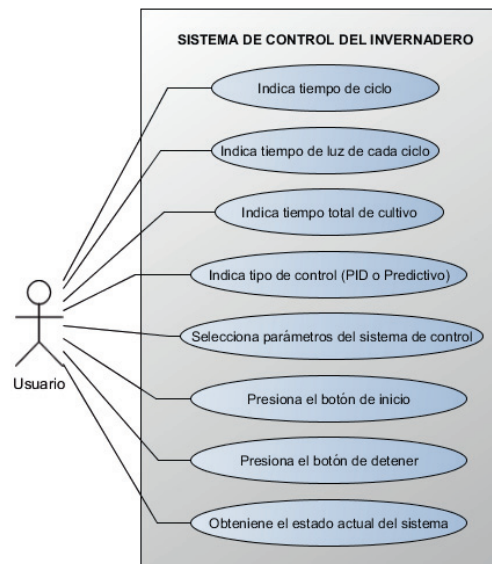


Figura 7: Diagrama de casos de uso

Nuestro sistema, como se puede ver en el esquema de la Figura 8, consta de un computador con un procesador Pentium IV y un 1 GB de memoria RAM.

El resultado final es la interfaz de usuario mostrada en la Figura 9, la cual permite a un usuario interactuar fácilmente con el sistema físico de iluminación. Las funcionalidades de este sistema se describen a continuación.

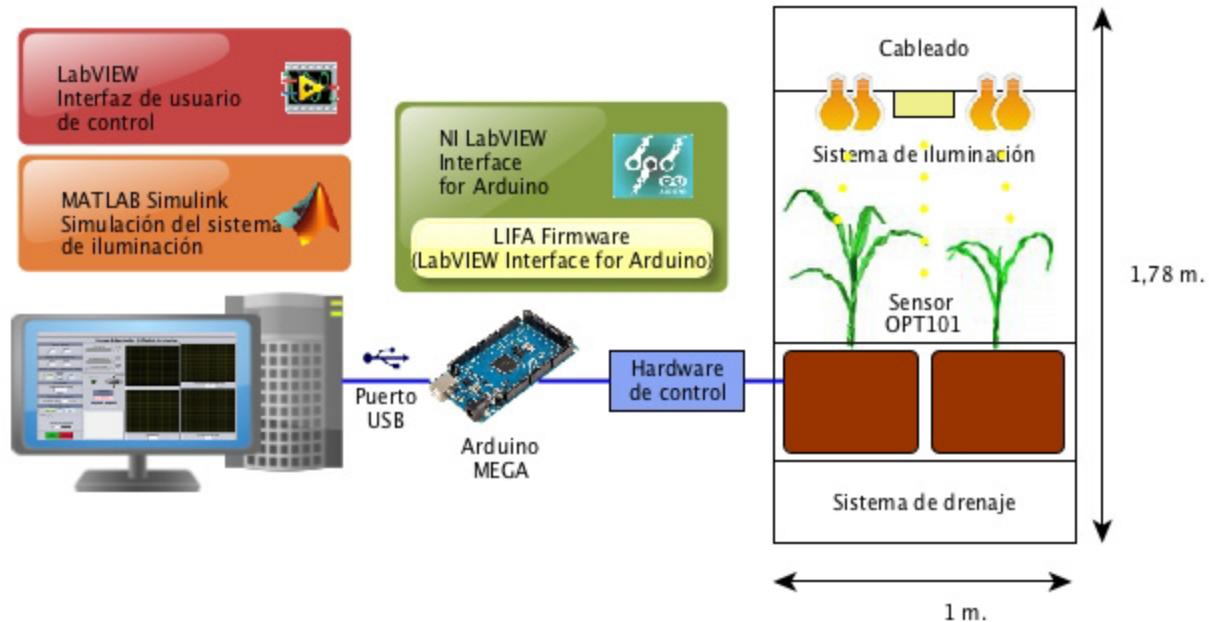


Figura 8: Esquema del sistema hardware y software del invernadero

La comunicación de las señales entre el ordenador y el Arduino se establece a través del puerto USB. Para poder conectar Arduino y LabVIEW es necesario instalar previamente la Interfaz de National Instruments para el Toolkit de Arduino y cargar el firmware LIFA (LabVIEW Interface for Arduino) en la placa.

La interfaz permite al usuario introducir los diferentes parámetros de entrada que dictarán el funcionamiento del sistema de iluminación del invernadero. A su vez la interfaz aporta la información sobre el estado de la iluminación durante su ejecución, siendo esta información generada por el sistema mediante la adquisición de la señal del sensor de iluminación y el procesamiento de esta señal.

La interfaz ofrece flexibilidad para adaptar el control a diferentes tipos de cultivo y además permite visualizar en tiempo real mediante gráficas las variables en el funcionamiento del sistema, como son la energía lumínica por ser absorbida, la cantidad de luz irradiada en el tiempo transcurrido del ciclo actual, el tiempo y el número de ciclos, entre otros. Otra de las características fundamentales es que permite seleccionar, mediante simplemente un botón, el algoritmo a utilizar (Predictivo o PD) en el proceso de control y, adicionalmente, los parámetros propios de cada algoritmo.

En último lugar, cabe mencionar que independientemente del software descrito anteriormente también se ha utilizado el software Matlab-Simulink® para obtener el modelo matemático del sistema de iluminación y hacer una simulación previa del sistema de control.

5. Modelado Matemático y Estrategias de Control Implementadas

Tal como se ha mencionado en la Sección 3, el sistema de iluminación consta de una lámpara LED y cuatro lámparas

halógenas que se activan a pares. Mediante un Modulador de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), se regula la intensidad lumínica de cada par de lámparas halógenas. La variación del PWM es de 0 a 255.

Una vez que el primer par de halógenas ha alcanzado su máxima capacidad de iluminación, se activan las lámparas LED y luego el segundo par de halógenas. Este último grupo es controlado mediante un sistema de relés que permiten variar su estado entre encendido y apagado (on/off) mediante una señal digital proveniente del dispositivo Arduino.

Este diseño de hardware requiere que el modelo matemático permita una condición de trabajo donde las lámparas regulables trabajen de manera independiente y otra en el que las lámparas auxiliares trabajen en conjunto con las lámparas regulables.

Se realizan pruebas experimentales en las que se varía el ancho del pulso del PWM y se recogen los datos de tensión provenientes del sensor de intensidad lumínica OPT101 de National Instruments. Los datos obtenidos se muestran en la Figura 10.

En base a estos datos de entrada-salida se ha aplicado el método clásico conocido de mínimos cuadrados para obtener el modelo que más se ajusta de la siguiente forma:

$$G(z) = \frac{V(z)}{A(z)} = \frac{0.003503}{z - 0.7469} \quad (1)$$

Siendo $V(z)$ la tensión de salida del sensor de intensidad lumínica y $A(z)$ es el ancho del pulso del PWM. La Figura 11 muestra un esquema que describe cómo se ha realizado la identificación del modelo dado en la ec. (1);

Se pretende en este trabajo utilizar un controlador PID predictivo. Un controlador PID discreto se describe de la siguiente forma:

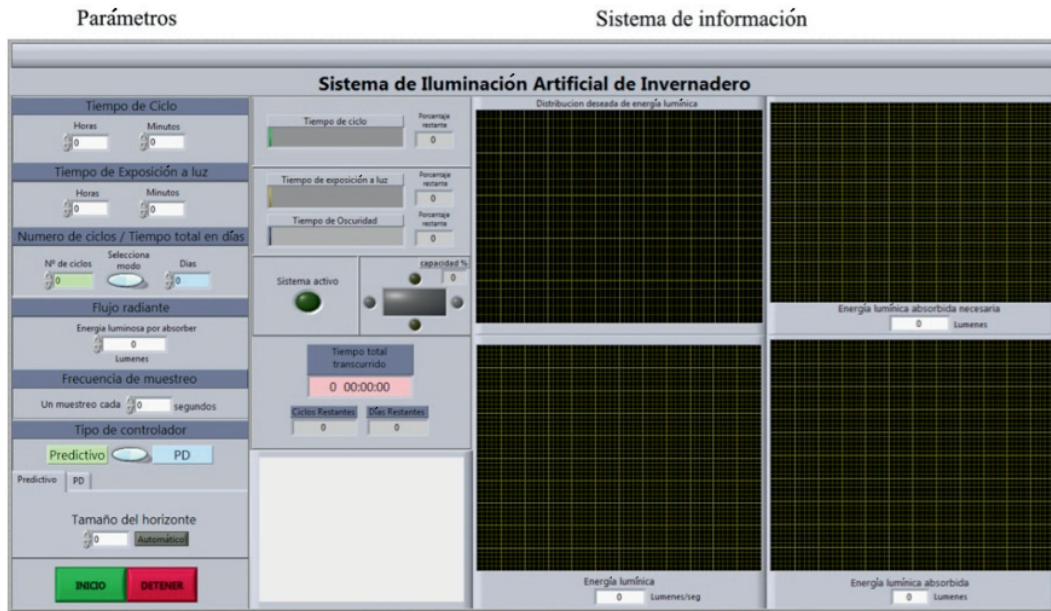


Figura 9: Interfaz de Usuario para el Control del Sistema de Iluminación

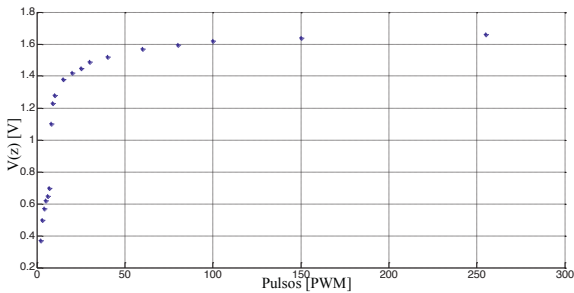


Figura 10: PWM vs Intensidad lumínica en Voltios obtenida por el sensor

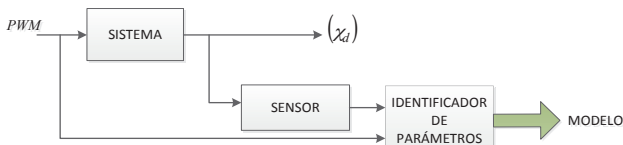


Figura 11: Esquema de Identificación utilizado.

$$u(n) = K_p e_1(n) + K_I T \sum_{k=1}^n e_1(k) + \frac{K_D}{T} [e_1(n) - e_1(n-1)] \quad (2)$$

Donde $e_1(n)$ se obtiene discretizando la señal desde $e_1(t)$ utilizando un convertidor A/D mientras $u(n)$ se convierte en una señal analógica utilizando un convertidor D/A.

Para los sistemas con tiempo de retardo de T segundos, se puede beneficiar en predecir el valor siguiente de $e_1(t)$, es decir, $e_1(n+1)$ y luego calcular $u(n+1)$ desde la ec. (2). Este valor es accesible para el convertidor D/A en el instante $t=(n+1)T$ y por tanto se elimina el efecto del tiempo de retardo. Sin embargo, se pueden introducir errores en el sistema porque el valor predicho

$e_1(n+1)$ se usa en lugar del valor verdadero. Se propone un algoritmo sencillo de un controlador lineal predictivo cuya fórmula es:

$$e(n) = e(n-1) + [e(n-1) - e(n-2)]$$

Utilizando este algoritmo para predecir $e_1(nT)$ en (2), se puede describir el controlador PID predictivo como sigue:

$$u(n) = K_p \left[2e_1(n-1) - e_1(n-2) + K_I' \left[\sum_{k=1}^{n-1} e_1(k) + 2e_1(n-1) - e_1(n-2) \right] + K_D' [e_1(n-1) - e_1(n-2)] \right]$$

Siendo $K_I' = K_I T$ y $K_D' = K_D / T$

La transformada z del controlador propuesto es:

$$\frac{U(z)}{E_1(z)} = \left[K_p \left(\frac{2z-1}{z^2} \right) + K_I' \left(\frac{3z^2-3z+1}{z^2(z-1)} \right) + K_D' \left(\frac{2z-1}{z^2} \right) \right] \quad (3)$$

El polo en el origen de la ec. (3) resulta del tiempo de retardo T .

Uno de los polos en el origen de la ec. (3) resulta del segundo tiempo de retardo T .

Para los sistemas con tiempo de retardo T en el lazo de control, ya sea causada por cálculos en el controlador o retardos en la planta y el sensor, este retardo puede considerarse que se produzca en la entrada al controlador. Por tanto, la entrada al controlador en la ecuación (2) es $e_1(n-1)$. En (3) es ya asumido que la entrada del regulador es $e_1(n-1)$ lo que se supone una ventaja del controlador PID predictivo propuesto con respecto al controlador PID (Astrom, et al., 1995).

Para los sistemas con tiempo de retardo T en el lazo de control, ya sea causada por cálculos en el controlador o retardos en la planta y el sensor, este retardo puede considerarse que se produzca en la entrada al controlador. Por tanto, la entrada al controlador en la ecuación (2) es $e_1(n-1)$. En (3) es ya asumido que la entrada del regulador es $e_1(n-1)$ lo que se supone una ventaja del controlador PID predictivo propuesto con respecto al controlador PID (Astrom, y otros, 1995).

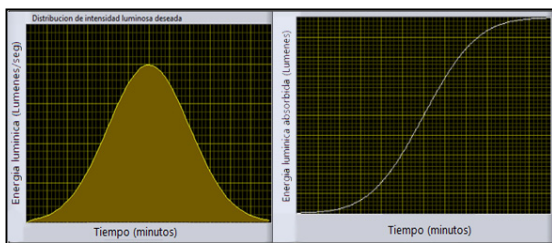


Figura 12: Distribución de energía en forma de campana gaussiana

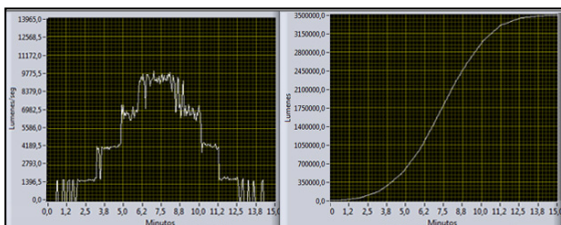


Figura 13: RMS= 21359. Izquierda energía lumínica. Derecha Energía lumínica irradiada en el ciclo

En la Tabla 1 se resumen las pruebas experimentales presentadas en este artículo. Se ha implementado un PI predictivo con $K=0,22$ y $T_i=0,63$. Se han realizado tres pruebas variando la ganancia y el tiempo integral alrededor de los valores $K=0,22$ y $T_i=0,63$ para conseguir la mejor respuesta tanto en el régimen transitorio como permanente.

La primera prueba resultó la de menor error cuadrático medio, lo cual implica una mayor precisión sobre la variable controlada, es decir la energía lumínica acumulada, tal como se evidencia en la Tabla 1. Sin embargo, ésta presenta mayores fluctuaciones en el encendido y apagado de las lámparas regulables al iniciar y finalizar cada ciclo de luz como se observa en la Figura 13 en comparación con la prueba número dos y tres (Figura 14 y 15).

Tabla 1: Pruebas de algoritmo de control predictivo

| Indicador | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Error cuadrático medio, RMS | 21359 lúmenes | 39888 lúmenes | 63863 lúmenes |

Pruebas similares fueron realizadas empleando un algoritmo de control PD cuyas constantes T_d y K , mostradas en la Tabla 2, fueron determinadas de manera empírica.

Con el algoritmo de control PD se obtuvo un resultado con un error cuadrático aproximadamente 5% inferior en comparación

6. Resultados Experimentales

Con el fin de analizar el comportamiento y funcionamiento del sistema de control de iluminación fueron realizadas distintas pruebas usando un algoritmo de control PD y un algoritmo predictivo. Adicionalmente fue tomado en consideración el comportamiento de la distribución de la energía lumínica en los periodos de luz teniendo como patrón de comparación la distribución en forma de campana gaussiana así como su acumulada como se observa en la Figura 12.

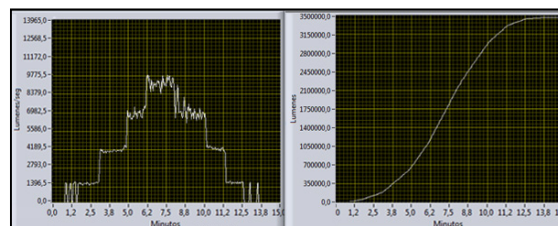


Figura 14: RMS= 39888. Izquierda energía lumínica. Derecha Energía lumínica irradiada en el ciclo

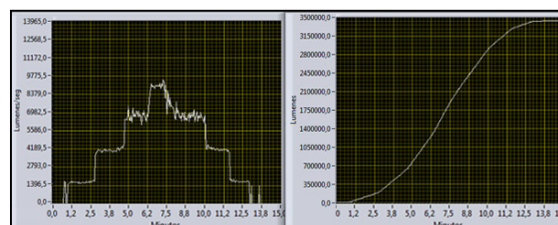


Figura 15: RMS= 63863. Izquierda energía lumínica. Derecha Energía lumínica irradiada en el ciclo.

con el control proporcional, sin embargo no se puede concluir que uno sea más preciso que el otro ya que el resultado varía en función de los parámetros introducidos. No obstante ambos presentaron fluctuaciones notables en comparación con el algoritmo de control predictivo como se muestra en las Figuras 16 y 17. El control predictivo presenta un comportamiento más estable en cuanto a fluctuaciones se refiere, ya que anticipa los cambios en tiempos futuros y genera señales de salida en el presente que amortiguan dichos cambios de una manera más suave. Estas fluctuaciones de la intensidad podrían generar consecuencias negativas en el proceso de fotosíntesis así como también en la vida útil de todo el sistema de iluminación.

Tabla 2: Pruebas de algoritmo de control P y PD

| Indicador | Prueba 1 | Prueba 2 |
|-----------------------------|---------------|------------------|
| K | 0.07 | 0.03 |
| T_d | 0.07 | 0 |
| Error cuadrático medio, RMS | 34565 lúmenes | 36293,25 lúmenes |

Si además comparamos el menor error cuadrático medio obtenido en las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones con ambos controladores, se observa que el control predictivo presenta un error 38% inferior al control PD, lo cual se traduce en mayor precisión sobre la variable controlada. Estos dos puntos de comparación permiten concluir que el control predictivo se ajusta de manera más eficaz al sistema desarrollado.

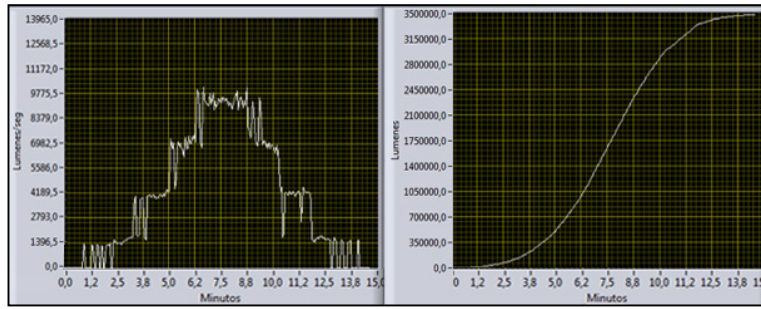


Figura 16: Resultado control PD con $K=0.07$ $TD=0.07$ $RMS= 34565$. Izquierda energía lumínica. Derecha Energía lumínica irradiada en el ciclo.

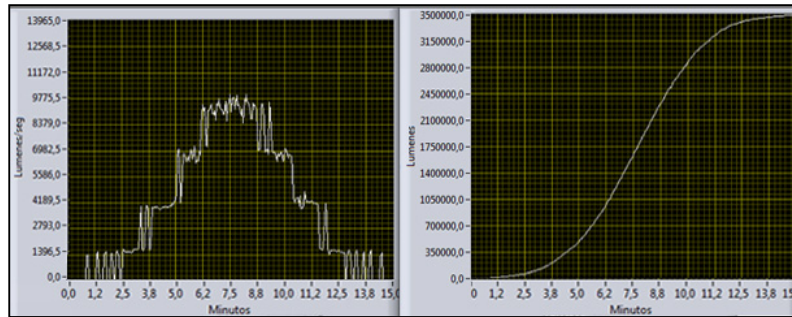


Figura 17: Resultado control PD con $K=0.03$ $TD=0$ $RMS= 36293.25$. Izquierda energía lumínica. Derecha Energía lumínica irradiada en el ciclo

7. Conclusión

En este artículo se ha presentado el desarrollo hardware y software para un sistema de iluminación artificial para cultivos protegidos. El sistema se basa en un conjunto de 4 lámparas halógenas y una lámpara LED y la electrónica de potencia desarrollada para regular la intensidad lumínica.

Se desarrolló además una interfaz de usuario en LabVIEW muy intuitiva que permite seleccionar el modo de control, los parámetros y recoger datos en tiempo real de la intensidad lumínica, la cantidad de luz irradiada en el fotoperiodo y el estado de las lámparas.

Se implementaron dos estrategias de control: control predictivo y PD. El primero permite generar las señales de salida que minimizan el error futuro de la variable controlada mientras que con el segundo intenta seguir la señal de referencia en forma de campana gaussiana.

Comparando los resultados obtenidos se puede observar que el control predictivo generó menores fluctuaciones en el encendido y apagado de las lámparas lo cual podría influir en la vida útil de las mismas. Además el control predictivo presentó un error cuadrático medio 38% inferior al control PD luego de realizar pruebas bajo las mismas condiciones de trabajo.

El sistema de distribución de la energía lumínica propuesto podría suponer un ahorro de consumo eléctrico en la iluminación de invernaderos, ya que es entregada solo la cantidad específica de energía indicada en los parámetros de funcionamiento en la interfaz de usuario, además la distribución simula a la luz natural irradiada por el sol pretendiendo llevar a cabo el proceso de fotosíntesis de manera eficiente y considerando las condiciones ambientales propicias para este proceso.

En investigaciones futuras es preciso el estudio con cultivos reales con el fin de analizar el ahorro energético maximizando el crecimiento del cultivo.

English Summary

Development of an Artificial Intelligent Lighting System for Protected Crops

Abstract

This article describes the hardware and software development of an artificial lighting system for protected crops. The system consists of a set of lamps, power control circuits and light intensity sensor, which together with a software developed in LabVIEW® allow to carry out the control over the amount of energy radiated throughout the cultivation process taking into consideration how this energy is distributed in each photoperiod. All this monitoring process takes place in a computer which is connected to an Arduino MEGA device serves as data acquisition card. To program the operation of the control system an interface is designed that enables the user to input parameters and display the system operating information. It also allows selecting the appropriate control strategy with a choice of selecting a predictive control or PD control system. Both algorithms make use of a mathematical model of the lamps which is responsible for transforming the signals generated by the drivers in digital signals that govern the operation of the implemented electronic system. Finally, the experimental results are analysed in various tests using both control algorithms to show the benefits and disadvantages of each controller.

Keywords:

Modeling, predictive control, PD control, software tools, computer interfaces.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo y la financiación concedida por el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Referencias

- Astrom, K. J., and T Hagglundruna. "PID Controllers: Theory, Design and Tuning." ISA: The Instrumentation, Systems and Automation Society; 2 Edition, ISBN-10: 1556175167, 1995.
- Balas, M.M. "Modeling Passive Greenhouses. The Sun's Influence." *INES 2008. Intelligent Engineering Systems, IEEE*. Miami, FL, 2008.
- Camacho, E. F., and C. Bordons. *Model Predictive Control*. 2nd Edition, Springer-Verlag, 2004.
- Coelho, J.P., P.B. de Moura Oliveira, and J. Boaventura Cunha. "Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm." In *Computers and Electronics in Agriculture*. Bragança: Elsevier, 2005.
- Fernandez Diaz, Alberto. *Diseño de un controlador climático para un invernadero*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, 2011.
- Gerhard, Buck-Sorlin, Reinhard Hemmerling, Jan Vos, and Pieter de Visser. "Modelling of Spatial Light Distribution in the Greenhouse: Description of the Model." *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2009 Third International Symposium on*. Beijing: IEEE, 2009. 79-86.
- Guofang, Li, Qi Yubin, and Liu Shengtao. "Remote monitoring system of greenhouse environment based on LabVIEW." *Computer Design and Applications (ICCD), 2010 International Conference on*. Qinhuangdao: IEEE, 2010. 89-92.
- Guzman, J L, and F Rodriguez. "Laboratorio virtual para la enseñanza de control climático de invernaderos." *RIAI (RIAI)*, 2005: 88-92.
- Huang, Yuehua, Lei Wu, and Jie Zhu. "Research of fuzzy control system about greenhouse supplement light lamps based on single-chip microcomputer." *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*. Jinan: IEEE, 2010. 3751- 3754.
- Li, Ying. "A Further Study on the Representation Method of Plant Photosynthetic Capacity Based on Unsaturated Light-Induced Delayed Fluorescence Intensity." *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2011 Symposium on*. Wuhan: IEEE, 2011. 5.
- Loor Loor, Carlos. "Puesta en Marcha de un Sistema de Medición de Humedad y Temperatura en un Invernadero." Madrid, 2013.
- Maciejowski, J.M. *Predictive Control with Constraints*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- Martinez, M, X Blanco, J M Herrero, C Ramos, and J Sanchis. "Monitorización y control de procesos. Una visión teórico-práctica aplicada a invernaderos." *RIAI*, 2005: 5-24.
- Mayne, D. Q., J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. M. Scokaert. "Constrained model predictive control: Stability and optimality." 2000: 330–344.
- Ogata, Katsuhiko. "Controladores PID e introducción al control robusto." In *Ingeniería de Control Moderna*, by Katsuhiko Ogata, 987. Minnesota: Pearson, 1998.
- Rawlings, J. B., and D. Q. Mayne. *Model Predictive Control: Theory and Design*. 1st Edition, Nob-Hill Publishing, 2009.
- Valero Muñoz, Antonio. "Fotometría." In *Principios de color y holopintura*, by Antonio Valero Muñoz, 420. San Vicente Alicante: Club Universitario, 2011.
- Wang, Shoubing. "An Intelligent Controlling System for LED Plant Supplemental Lighting Greenhouse." *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium on*. Shanghai: eeexplorer, 2012. 1 - 3.
- Yuanping, Li, Huacai Chen, Huihua Ji, Shoubing Wang, and Zhouhong Zhu. "Effect of LED Supplemental Illumination on the Growth of Strawberry Plants." *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium on*. Shanghai: IEEE, 2012. 1-4.