

Control PID aplicado a un prototipo de fototerapia PID control applied to a phototherapy prototype

G. R. Peñaloza-Mendoza ^a, D.A. Adame-Resendis ^{a,*}, J. García-García ^a

^a Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

Resumen

Dentro del área biomédica el control de las variables de los procesos es fundamental, debido a que un pequeño error influye directamente en la salud de las personas, no existe margen de error, por ejemplo, en la aplicación de fototerapias el control de la intensidad de radiación ultravioleta determinará la efectividad de los tratamientos. Debido a esto, en el presente trabajo, se aborda el diseño y construcción física de un prototipo de cama de fototerapia, la cual fue construida mediante impresión 3D, además de un sistema de control para la regulación luminosa ante perturbaciones externas. Se realiza el control de luminosidad mediante la implementación de una acción de control PID digital sobre un microcontrolador ATmega328P132 que otorga la respuesta a una lámpara LED la cual varía la intensidad de acuerdo a la diferencia detectada entre el nivel deseado para el tratamiento y el valor detectado mediante un sensor de luminosidad.

Palabras Clave: Fototerapia, Control de luminosidad, Instrumentación Médica

Abstract

Within the biomedical area, the control of the variables of the processes is fundamental, because a small error directly influences the health of people, there is no margin of error, for example, in the application of phototherapies, the control of the intensity of Ultraviolet radiation will determine the effectiveness of the treatments. Due to this, in the present work, the design and physical construction of a phototherapy bed prototype is addressed, which was built by 3D printing, as well as a control system for light regulation in the face of external disturbances. The luminosity control is carried out through the implementation of a digital PID control action on an ATmega328P132 microcontroller that gives the response to an LED lamp which varies the intensity according to the difference detected between the desired level for the treatment and the detected value. using a light sensor.

Keywords: Phototherapy, Light control, Medical Instrumentation

1. Introducción

Los neonatos, bebés nacidos prematuramente de 36 semanas o menos, cuentan con una incidencia mayor a ser propensos a presentar ictericia, que los neonatos que llegan a término, de 37 a 41 semanas de gestación, sin embargo, más del 50% de los neonatos presentan ictericia en algún momento durante la primera semana de vida (Galíndez, 2017). La fototerapia es el tratamiento comúnmente utilizado para la hiperbilirrubinemia neonatal y se basa en la fotodegradación que experimenta la bilirrubina in vivo e in vitro, dando lugar a fotoproductos más polarizados que son, por tanto, más hidrosolubles y más fácilmente excretables (Galíndez, 2017). En los procesos industriales, la mayoría de los controladores

reguladores son del tipo PID. Su popularidad se debe a la simplicidad del ajuste de sus parámetros y al hecho de estar disponible en casi todos los equipos de control de la industria (Ogata, 2010). Un controlador PID calcula inicialmente el "error", entre su variable controlada (medida) y su valor deseado (setpoint) y en función de este error genera una señal de control para eliminar el desvío probable (Lozano, 2012). El algoritmo PID usa el "error" en tres módulos distintos para producir su salida o variable manipulada (Moreno, 2018). Los nombres, proporcional (P), integral (I) y derivativo (D), son usados para definir los principales controles usados en la práctica (Alfaro, 2012). El desarrollo de tecnologías para el apoyo a neonatos con problemas de ictericia, ha tenido la necesidad de buscar una evolución, para mejorar la atención.

*Autor para la correspondencia: grey@itspa.edu.mx

Correo electrónico: grey@itspa.edu.mx (Guillermo Rey Peñaloza-Mendoza), danieladamerendis4309@gmail.com (Daniel Adame-Resendis), jesgarxia99@gmail.com (Jesús García-García).

Por ejemplo, en Cuenca (2014) se diseña un prototipo basado en una lámpara de fototerapia Led, la cual, posee un sistema de control digital de luminosidad para el tratamiento de ictericia y un mecanismo de posicionamiento de la matriz de Leds, la lámpara se compone por una matriz de 12 leds, los cuales poseen características especiales para la degradación de bilirrubina en el cuerpo del paciente.

En un trabajo presentado por Rodríguez (2018), se planteó que la unidad de fototerapia debe ser una alternativa que evite la separación de la madre y el neonato. A lo cual se propuso el desarrollo de un prototipo de manta para fototerapia como apoyo al tratamiento de ictericia neonatal. El trabajo realizado por Zegarra (2007), presenta el diseño de un sistema de fototerapia implementada con un arreglo matricial de Leds, esto con la finalidad de dar una alternativa de solución para los pacientes del área de dermatología de ese modo puedan tener una mejor calidad de atención.

En su trabajo Castro (2018), plantea un prototipo de lámpara de fototerapia con un sistema de control estable, efectivo y fácil de utilizar para los usuarios en el tratamiento de ictericia en neonatos. Para la lámpara se selecciona una tira led RGB la cual utiliza luz azul, cuenta con un driver de potencia en base a transistores MOSFET, además el control se realiza mediante señales PWM para variar la corriente y la potencia de los leds. En Bravo (2018) se plantea el desarrollo de un equipo de fototerapia para el tratamiento de la ictericia neonatal modelando matemáticamente un LED para distribuir uniformemente la irradiación generada, además se hace el modelado de un proceso para establecer un sistema de control proporcional, integral y derivativo de la potencia de luz.

El desarrollo del trabajo se presenta organizado de la siguiente manera. En la Sección II se establece al problema existente en el control de luminosidad dentro de las terapias médicas, así como la solución propuesta. En la Sección III establece el diseño del prototipo a escala de la cama de fototerapia, así como el bosquejo general de la implementación del control digital con acción proporcional, integral y derivativa (PID) y la electrónica necesaria para su implementación. En la Sección IV, se presenta la construcción física del prototipo de la cama de fototerapia y la implementación del control PID para mantener la luminosidad necesaria, además, se agregan entradas que permiten manipular las constantes del controlador, para adaptarse a las condiciones externas del área donde sea colocada la cama de fototerapia. Por último, las Secciones V y VI presentan los resultados obtenidos a diferentes condiciones de luminosidad y variación de parámetros en el control PID, y las conclusiones propias del trabajo realizado, respectivamente

2. Planteamiento del problema y solución propuesta

En los centros médicos el tratamiento de fototerapia se realiza en los neonatos con lámparas instaladas en cunas fijas, que se encuentran en el área de cuidados intensivos para mantener condiciones de luminosidad externas constantes que no intervengan en la terapia, por lo tanto, estas no pueden ser trasladadas al cuarto de la madre, lo que provoca que sea necesario trasladar al neonato a ser atendido, lo que a su vez requiere apartarlo de la madre durante el tratamiento.

Debido a esto, se propone implementar un prototipo de cama de fototerapia que sea funcional y pueda utilizarse en distintos entornos con diferentes condiciones de luz ambiental.

Para esto, se implementa un control PID con ajuste manual de sus parámetros y del valor de referencia, esto permitirá al usuario sintonizar la respuesta del control de acuerdo a las necesidades, con esto la cama podrá ser empleada en cualquier sitio sin tener ningún tipo de efecto negativo en el funcionamiento, al no requerir ambientes controlados para su uso.

3. Diseño del Prototipo

El diseño del sistema de control de lazo cerrado se basa en el mostrado en la Fig. 1, donde se puede observar que la salida del sistema es otorgada por la lámpara de fototerapia compuesta por una matriz de LEDs de 8x8, la intensidad luminosa de la luz emitida por la lámpara es detectada una fotoresistencia, la cual otorga mediante un divisor de voltaje una respuesta de voltaje proporcional con respecto a la detección de luz, la cual fungirá como retroalimentación del sistema de lazo cerrado.

La señal de retroalimentación es enviada al controlador ATmega328P, cuya función es tomarla y compararla con el valor deseado establecido, con el resultado de la comparación se realizan las operaciones necesarias para implementar el control PID y mandar una respuesta de salida en forma de PWM para el control de la intensidad luminosa de la matriz de LEDs, la conexión eléctrica del sistema esto puede verse representada en la Fig. 2.

Por otro lado, el diseño propuesto para la cama de fototerapia fue realizado utilizando empleando el software Fusion360 de Autodesk, el diseño toma como referencia la simplicidad de las camas hospitalarias para neonatos, las cuales cuentan con una base donde se coloca el colchón para colocar al neonato, además de protecciones para evitar se desplace a un lado, en este caso, se adaptan soportes para la colocación de la matriz de LEDs.

En las Fig. 3 y 4 se muestran los diseños realizados en 3D del prototipo de la estructura de la cama de fototerapia.

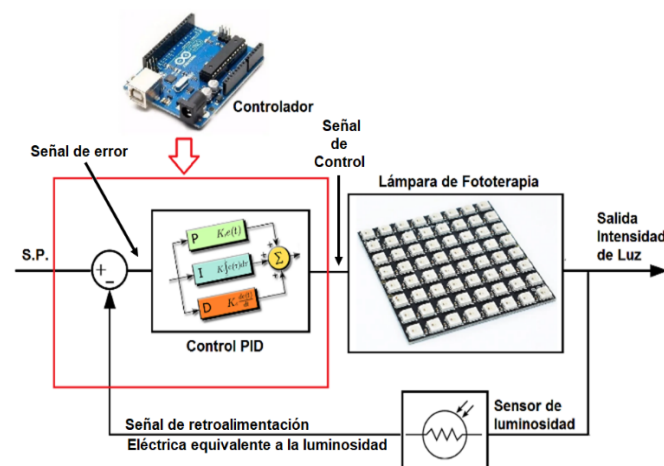


Figura 1: Diagrama del sistema.

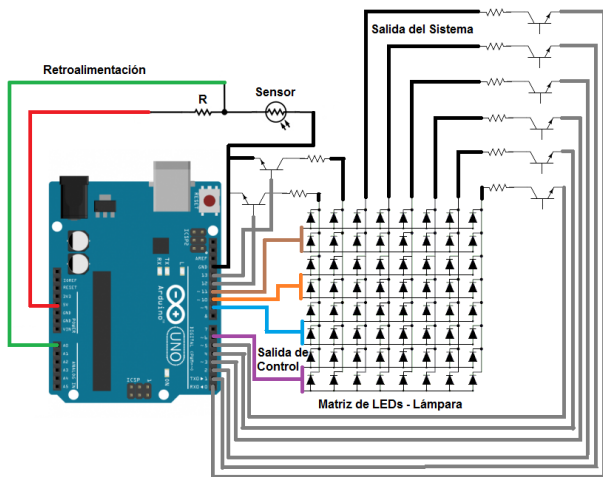


Figura 2: Diagrama de conexión eléctrica.

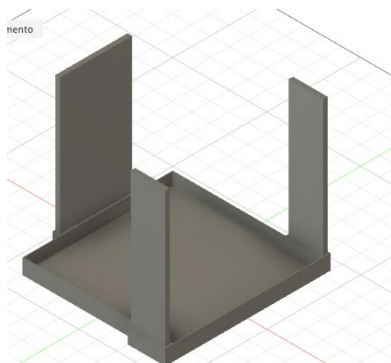


Figura 3: Diseño 3D de la base del prototipo

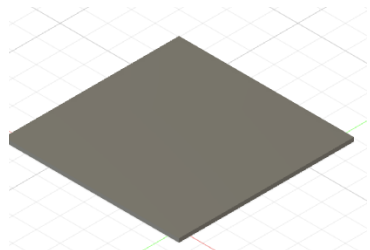


Figura 4: Diseño 3D de la base superior de la matriz de LEDs.

4. Desarrollo Experimental

La construcción física del prototipo se realizó mediante la impresión 3D del chasis de la cama, esta se imprimió a nivel escala 1 a 5, con las adecuaciones necesarias para construirla por las características de la impresora 3D. Para la impresión se utilizó una impresora Artillery SideWinder X1, su tiempo de impresión total fue aproximadamente de 3 horas y 25 minutos, gastando un aproximado de 120 gramos de material PLA con un relleno del 30%. La estructura física de la cama de fototerapia tiene las siguientes características:

- Base portacolchon: forma cuadrada con salientes tipo cajón alrededor para la colocación del colchón.
 - Dimensiones: 18 cm por lado
 - Saliente: 1.5 cm de alto
 - Soportes: 3 soportes de 18 cm de alto, dos de 4 cm de ancho y uno de 9 cm de ancho.
- Base matriz de LEDs: forma prismática para la colocación del circuito de la matriz.
 - Dimensiones: 18 cm por lado
 - Alto: 4 cm

Una vez impreso el modelo se colocaron en la parte superior en forma de matriz 64 leds que abarcan completamente la parte superior, posteriormente se soldaron los leds, teniendo así un cuadro de 8X8. Cabe mencionar que el espectro de onda cercana a la ultravioleta se logra obtener utilizando LEDs Ultra-brillantes violetas. Para suministrar la corriente necesaria a cada LED de la matriz, se utilizan transistores 2n2222 para conmutar la tierra eléctrica a cada columna de la matriz mediante el uso de un pin digital, y conectando los positivos directamente a un pin del microcontrolador con señal PWM que controlará la intensidad. Esto mandará la señal PWM por columnas, suministrando menos energía en cada instante de la activación, como se observa en la Fig. 2. Así mismo, se añadió una pantalla LCD que servirá para visualizar información del sistema, tal como los datos de luminosidad detectada por el sensor y los valores de las ganancias del controlador. Por último, se ensambló la parte inferior con la superior de la estructura de la cama, así como se realizaron las conexiones con el microcontrolador, posteriormente el microcontrolador, el transistor y los LEDs se soldaron todos los componentes en una placa fenólica para así evitar falsos contactos (Ver Fig. 5 y 6). Así mismo para darle el terminado de cama, se realizó el diseño de un colchón a escala que fue el detallado final del proyecto. (ver Fig. 7). Una vez construida la estructura de fototerapia, se incorporó una fotorresistencia que funcionaría como retroalimentación del sistema. Posteriormente se procedió a utilizar el software Arduino® para realizar la programación para el control del equipo. Primeramente, se agregó la librería llamada “U8glib.h, la cual permite manipular la LCD que utilizamos y así brindarnos los valores visualmente, seguido de la declaración de cada fila de Leds recordando que se realizaron 4 filas. Por lo que contaremos cada fila como un solo Led. También se declararon los 8 transistores que se ocuparían en cada inicio de la columna para la tarea mencionada anteriormente.

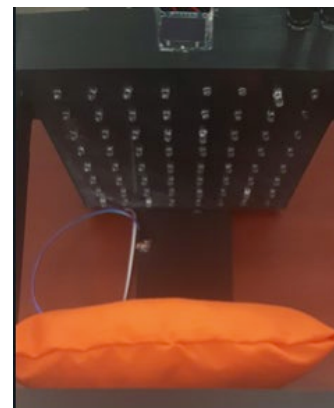


Figura 5: Visualización del modelo impreso



Figura 6: Conexiones del prototipo



Figura 7: Montaje del colchón.

Posteriormente, se realiza la adquisición de la señal de la retroalimentación entregada por el divisor de voltaje de la fotoresistencia, la señal al no ser constante debido a la propia naturaleza de la fotoresistencia, se implementa un filtrado digital de Promedio Exponencial suficiente para eliminar los picos no deseados en la señal de entrada, para ello se buscó el valor de α al azar que nos pudieran brindar un filtrado más estable llegando por pruebas a ser de 0.05. Para las otras constantes que se tiene en la ecuación, la fotoresistencia es tomada como la lectura saliente y comparada con el valor de referencia, la ecuación (1) representa el filtro de promedio exponencial.

$$F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}) = \text{PromExp} \quad (1)$$

Implementación del Control PID digital

Ahora bien, el potenciómetro de referencia ¿qué función tiene?, este nos ayudará a poder controlar la intensidad de luminosidad que el usuario decida, permitirá realizar una comparación con la salida de la fotoresistencia y así la intensidad de los LEDs buscará llegar a la lectura deseada dando el equilibrio luminoso con el valor deseado (set-point), este equilibrio se logrará por la acción de control implementada en el microcontrolador.

Para la programación del control PID se creó una función en Arduino la cual permite variar K_p , K_i y K_d y de esta manera poder sintonizar el control del sistema de acuerdo a las necesidades o pruebas necesarias de este (Ver Fig. 8). La función fue creada de acuerdo a las ecuaciones para el controlador PID (ecuaciones 2 y 3), evitando así el uso de componentes electrónicos analógicos.

$$U_{PID} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d[e(t)]}{dt} \quad (2)$$

$$U_{PID}(k) = U_p(k) + U_i(k) + U_d(k) \quad (3)$$

Para la sintonización de las ganancias del controlador se emplea el método de lazo cerrado Ziegler y Nichols, donde se utiliza un controlador puramente proporcional aumentando la ganancia K_p hasta que el sistema presente una oscilación sostenida de periodo P_{CR} para un cambio tipo escalón en la entrada, a esta ganancia del controlador se le llama K_{CR} (Ogata, 2010). Los ajustes de las ganancias están dados por la ecuación (4) en función de P_{CR} y K_{CR} .

```
double computePID(double inp) { //funcion de control PID
  Setpoint=map(analogRead(PIN_SP),0,1023,0,100); //mapeo
  Kp=map(analogRead(PIN_P),0,1023,0,100); //mapeo de las
  Ki=map(analogRead(PIN_I),0,1023,0,100);
  Kd=map(analogRead(PIN_D),0,1023,0,100);
  currentTime = millis(); //tiempo actual igual al tiempo
  elapsedTime =(double)(currentTime-previousTime); //tien

  error=Setpoint-Filtro; //error es igual al setpoint mer
  cumError+=(error*elapsedTime); //error para el integral
  rateError=(error-lastError)/elapsedTime; //error derivc

  double output=Kp*error+Ki*cumError+Kd*rateError; //sali
  lastError=error; //el error anterior ahora seria el act
  previousTime=currentTime; // el tiempo previo seria ahc
  return output; //se regresa la salida para usar en el c
}
```

Figura 8: Función creada para la realización del control PID

$$\begin{aligned} K_p &= 0.6K_{CR} \\ K_i &= 1.2K_{CR}/P_{CR} \\ K_d &= 0.075K_{CR}P_{CR} \end{aligned} \quad (4)$$

La implementación de esta función otorgará un valor numérico correspondiente a la señal de control, siendo escalada en un rango de 0 a 255 para ser entregada por los puertos de salida de la tarjeta Arduino en forma de PWM hacia el circuito de la matriz de LEDs, esto permitirá el incremento o decremento en la intensidad de la luz siendo controlada con el PID de acuerdo a la variación de las condiciones externas de la luz y el ajuste realizado. La señal es la misma para cada uno de los elementos de la matriz.

5. Resultados

El prototipo final obtenido de un sistema de fototerapia es el mostrado en la Fig. 9, cuenta con una pantalla LCD donde se muestra el valor de luminosidad deseado y el valor de luminosidad detectado por la fotoresistencia cuando el sistema está en operación, mientras que se presentan los valores de las ganancias del sistema de control cuando se está en ajuste. Antes de iniciar las pruebas de funcionamiento, se procede a establecer los valores límites de intensidad luminosa y su relación en señal eléctrica de salida en el sensor, para esto mediante un luxómetro a luminosidad ambiente constante se mide la respuesta del sensor a una máxima y mínima potencia en la matriz de LEDs, dando los valores de la Tabla 1. Con estos valores, se establece el comportamiento de la fotoresistencia a través de una ecuación lineal, permitiendo con esto establecer en el sistema los valores de luminosidad en base a las lecturas recibidas.

Las primeras pruebas de funcionamiento se realizan haciendo cambios en las variables de control (K_p , K_i , K_d), de tal forma que se pueda verificar el funcionamiento de cada término empleado en el control a través de sus constantes, la visualización de la respuesta del sistema se observa de dos maneras distintas, de forma explícita en la iluminación del prototipo y de forma gráfica en el plotter que se encuentra en el software Arduino.

En las Figs. 10, 11 y 12 se muestran evidencias del funcionamiento del prototipo, variando los valores de las

ganancias de control K_P , K_I y K_D a condiciones constantes de luz externa. Las figuras muestran 4 gráficas las cuales representan el valor deseado de color azul, la salida del sistema de control de color anaranjado (no corresponde a las mismas unidades de las otras gráficas, pero se coloca para visualizar el comportamiento), la retroalimentación de color verde y el error del sistema en color rojo.

En la Fig. 10 se muestra la respuesta del sistema cuando el controlador se encuentra apagado, el valor deseado de iluminación es de 2500 lux, aproximadamente el 45% en una escala de 0 a 100%, la señal del error se mantiene constante diferente de cero después del transitorio, debido a que no existe un sistema que contrarreste el valor de la iluminación detectado por encima del deseado.

En la Fig. 11 se aprecia la respuesta del sistema activando el control proporcional con un valor deseado de luminosidad de 450 lux equivalente a un 8%, se puede observar que la respuesta del error (señal en rojo) tiende rápidamente a cero, pero presenta pequeñas oscilaciones. En la Fig. 12 se muestra la respuesta del sistema con el control PID activado completamente.

A continuación, se realizan pruebas fijando las ganancias del control, esperando que el sistema se estabilice y posteriormente haciendo cambios en la iluminación ambiente. La Fig. 13 muestra la señal de error, valor deseado menos el valor real, del sistema a un incremento de la iluminación ambiente de 384 lux equivalente a 6.8%, en ella se muestra que la perturbación es absorbida por el controlador hasta obtener un error cero. La Fig. 14 muestra la señal del error para una variación de 3183 lux, donde la luz ambiente fue reducida el equivalente a un 56%, lo que produce que el sistema incremente la potencia a la matriz de LEDs.

Tabla 1: Relación luminosidad y salida del sensor.

Potencia en Matriz	Luminosidad (Lux)	Señal Sensor (V)
0%	221	4.1
25%	1601	3.4
50%	3037	2.6
75%	4440	1.9
100%	5853	1.2

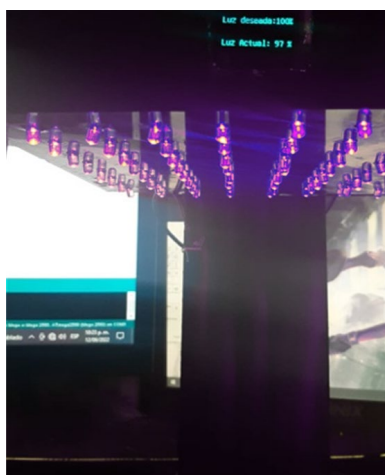


Figura 9: Pruebas del funcionamiento del prototipo.

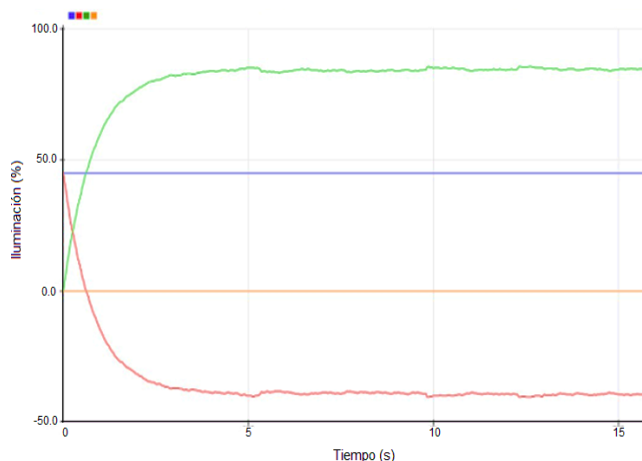


Figura 10: Respuesta del sistema con las constantes variables de control en 0.

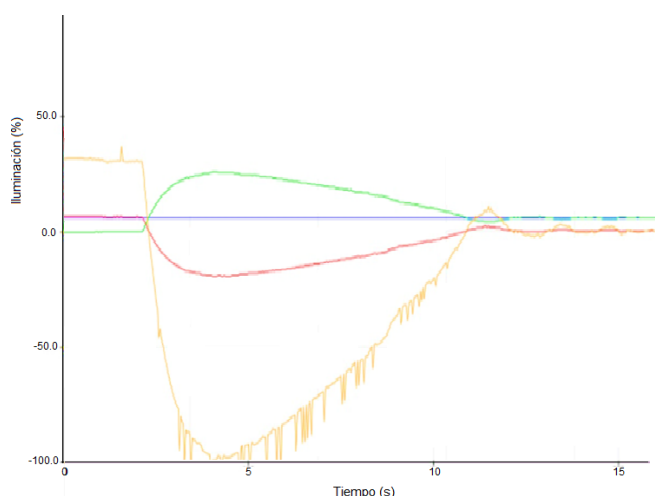


Figura 11: Respuesta del sistema con $K_p=5$, $K_i=0$, $K_d=0$

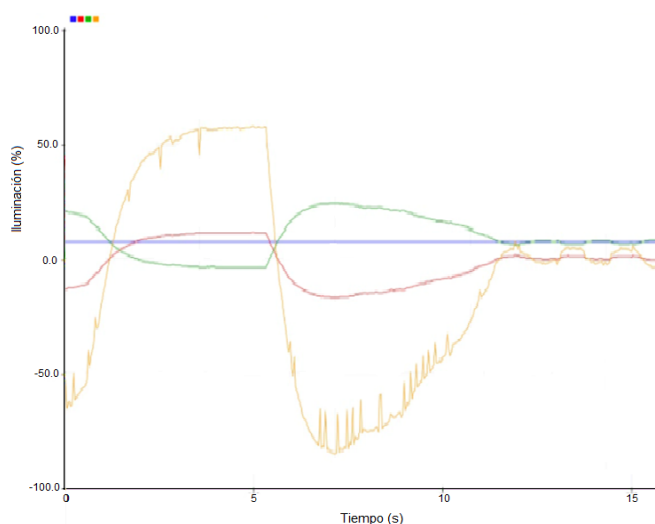


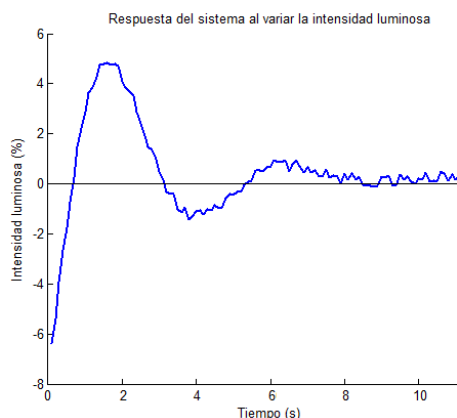
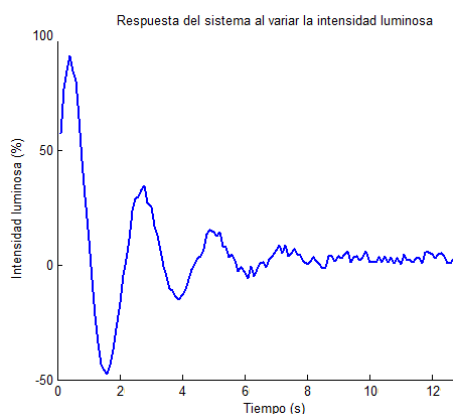
Figura 12: Respuesta del sistema para el controlador PID activado completamente con constantes de control $K_p=5$, $K_i=1$, $K_d=100$.

Adicionalmente, se realizan pruebas a diferentes valores de ganancias con una misma variación de entrada, para esto se utiliza una variación incremental de 384 lux, la cual se controla con una lámpara en el espacio de trabajo que se prende para hacer el cambio. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 2, donde se compara la efectividad del control a partir del error cuadrático medio (ECM), ecuación (5).

Tabla 2: Tabla comparativa de la efectividad a diferentes sintonizaciones.

Prueba	K_P	K_I	K_D	ECM
1	1	2	5	3.52
2	8	10	2	3.05
3	2	1	5	3.28
4	10	10	3	2.84

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (v_{deseado} - v_{medido})^2 \quad (5)$$

Figura 13: Señal de error del sistema con $K_p=1$, $K_i=2$, $K_d=5$ Figura 14: Señal de error del sistema con $K_p=8$, $K_i=5$, $K_d=2$

6. Conclusiones

Teniendo como objetivo diseñar y construir un prototipo de cama de fototerapia que pueda ser implementada sin importar las condiciones de luz externa, se obtuvo una lámpara de fototerapia impresa en 3D con la aplicación de un controlador PID, el cual, a partir de las pruebas realizadas se autocorrigió al existir una variación en la intensidad luminosa del ambiente,

mientras la variación se encuentre en el rango de trabajo del sistema, el cual momentáneamente es de 5000 lux.

Debido a la imposibilidad de adquirir una matriz de LEDs con el espectro de luz ultravioleta requerido para la fototerapia, se construyó una matriz de 8 x 8, conmutable, que permite activar líneas de 8 LEDs a la vez, disminuyendo el consumo de energía por activación parcial a alta velocidad. Así mismo, se implementaron ajustes de ganancias de manera externa que permiten sintonizar el controlador PID digital para trabajar en diferentes condiciones de luminosidad donde se encuentre la cama de fototerapia y lograr una mejor efectividad en la respuesta. Las pruebas realizadas emplean una fotoresistencia como sensor de luminosidad, sin embargo, este detecta todo el espectro de la luz visible, por lo que, en la implementación final el sensor de luminosidad debe ser cambiado por un sensor de luz azul que detecte las longitudes de onda de 460 a 490 nm, la cual es la más eficaz en tratamientos para la ictericia. Debido a la variabilidad de las lecturas entregadas por la fotoresistencia se implementó un filtro digital de promedio exponencial que permite eliminar los picos de la señal del sensor generados por la propia naturaleza de la señal.

Referencias

- Alfaro Ruiz, V. M. (2012). Ecuaciones para controladores PID universales. *Revista de la Universidad de Costa Rica*, 12(1), 12-21.
- Bravo Laura, C. E. & Morales Liela, P. C. (2018). Desarrollo de un equipo de fototerapia para el tratamiento de la ictericia neonatal, basado en tecnología de led azul, un control de irradiancia en lazo cerrado y un algoritmo de sugerencia de tratamiento. Tesis de Pregrado. Universidad de San Martín de Porres.
- Castro Moncada, J. C. (2018). Diseño e implementación de una lámpara de fototerapia led con control de luminosidad para tratamiento de ictericia en neonatos, Piura Perú: Universidad Nacional de PIURA.
- Cuenca Vicente, A. L. (2014). Diseño y construcción de un prototipo de lámpara de fototerapia con sistema de control digital para tratamiento de ictericia en neonatos. Cuenca Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Galíndez González, A. L., Carrera Benavides, S. R., Díaz Jiménez, A. A., & Martínez Burbano, M. B. (2017). Factores predisponentes para ictericia neonatal en los pacientes egresados de la UCI neonatal, Hospital Infantil los Ángeles de Pasto. *Univ. Salud*, 352-358.
- Lozano-Valencia, L. F., Rodríguez-García, L. F., & Giraldo-Buitrago, D. (2012). Diseño, Implementación y Validación de un Controlador PID Autosintonizado. *Tecnológicas*, (28), 33-53. ISSN 2256-5337
- Moreno García, F. E., Medina Delgado, B., Castro, S., Fuentes, J., & Sepúlveda Mora, S. (2018). Experimentación de controladores digitales clásicos en un sistema embebido aplicado en un proceso térmico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 81-92. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018008>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: Pearson. ISBN: 9788483226605
- Rodríguez, B. A. & González, J. L. (2018). Desarrollo de manta de fototerapia como apoyo al tratamiento de ictericia neonatal, vol. 1, Silao Guanajuato: Universidad Politécnica del Bicentenario.
- Zegarra Flores, J. V. (2007). Diseño de un sistema de fototerapia utilizando Leds aplicado en dermatología, Lima Perú: Pontificia universidad Católica del Perú.