

# Prototipo de luminaria LED con regulación de temperatura por PWM

**RESUMEN:** Este proyecto consiste en el desarrollo del prototipo de una luminaria con un sistema de regulación de temperatura. Cuando se presenta un calor acumulado excesivo por un diseño deficiente en la instalación de las luminarias, condiciones atmosféricas adversas y el propio calor generado por los diodos emisores de luz se puede afectar la fiabilidad y el tiempo de vida del dispositivo, sin embargo, una señal de corriente modulada por ancho de pulso puede ralentizar el incremento de temperatura, como lo demuestran los resultados experimentales adquiridos por el método de termografía infrarroja.

**Palabras clave:** luminaria, diodo emisor de luz, temperatura, termografía infrarroja, sistema embebido.



## Colaboración

Teth Azrael Cortes Aguilar; Aristeo Gutiérrez López; Jorge Arturo Ruvalcaba Villa, Instituto Tecnológico Superior de Zapopan

**ABSTRACT:** This project involves the development of a prototype lamp with temperature control system. When excessive cumulative heat occurs by poor design in the installation of the lamp, adverse weather conditions and heat itself generated by light emitting diodes can affect the reliability and lifetime of the device, however, a current signal by pulse width modulation can slow down the temperature increase, as shown by the experimental results obtained by the method of infrared thermography.

**KEYWORDS:** lamp, light emitting diode, temperature, infrared thermography, embedded system.

## INTRODUCCIÓN

El proyecto de luminaria LED con regulación de temperatura por PWM (Pulse Width Modulation) se propone como un prototipo electrónico en fase exploratoria, para proteger los diodos emisores de luz en luminarias para uso indistinto en interior y exterior cuando operan en condiciones de calor excesivo respecto a las especificaciones técnicas del dispositivo. Un diseño con poca disipación de calor, una instalación deficiente de la luminaria o condiciones atmosféricas de temperatura elevada así como una alta radiación solar incidente y una baja velocidad del viento son algunas de las causas que afectan la fiabilidad de los dispositivos LED en la luminaria cuando operan a temperaturas por arriba de su rango máximo recomendado. El prototipo de luminaria LED propone un diseño que incluye el uso de un sistema embebido para regular la temperatura mediante una señal PWM y un ensamblaje mecánico y electrónico que facilite la disipación de calor. Los resultados experimentales de la evaluación del prototipo se obtuvieron mediante el método de termografía infrarroja y muestran una reducción de la temperatura en respuesta a la señal de corriente modulada por ancho de pulso.

Se propone la implementación de la regulación de temperatura por PWM como una alternativa de diseño viable respecto a otros sistemas de enfriamiento como ventiladores o refrigerantes. El objetivo de la propuesta es permitir que la luminaria reduzca el calor generado por sus propios diodos emisores de luz o en su defecto se apaga cuando la temperatura excede un valor crítico. Esta acción de regulación facilita la disipación de calor. Una vez restituida la temperatura dentro de un rango aceptable la luminaria se enciende nuevamente.

### Fiabilidad y tiempo de vida de los LED respecto a la temperatura

Los diodos emisores de luz LED de estado sólido tienen el potencial de reducir el consumo de energía por iluminación hasta en un 50% revolucionando la manera en cómo se iluminan los lugares de trabajo, espacios públicos y hogares [8]. Sin embargo, a pesar de que los diodos emisores de luz tienen un tiempo de vida largo, de 3 a 5 años, un diseño deficiente en el sistema puede reducir su tiempo de vida.

El calor generado en la unión p-n es uno de los factores principales que afectan la duración del LED. Narendran et. al., reportan en su investigación, como varios LED blancos del mismo fabricante fueron sujetos a experimentos del tiempo de vida en diferentes temperaturas ambientales, concluyendo que el tiempo de vida de los LED se reduce de manera exponencial con un incremento de la temperatura. [6]

Por otro lado, los diodos emisores de luz con una reducción del 20% en la temperatura de la unión comparada con estructuras térmicas tradicionales muestran un incremento en la potencia de salida y la intensidad de luz radiada [2]. Una técnica comúnmente usada en ensamblajes electrónicos para mejorar la transferencia de calor es el uso de pasta silicona térmica entre el LED y el disipador. Sin embargo esta técnica depende de la capacidad del disipador para radiar el calor hacia el entorno, así como de las condiciones atmosféricas alrededor de la luminaria.

En México los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Tabasco y la península de Yucatán presentaron en el 2015 una temperatura máxima promedio mensual, entre 35°C y 40°C [13] que junto con otros factores atmosféricos como la velocidad del viento y la radiación solar, pueden incidir en un entorno desfavorable para la operación de luminarias LED.

### Aplicación del método de termografía infrarroja

Las características fotométricas del dispositivo, especialmente el flujo luminoso contra la potencia eléctrica y la temperatura de la lámpara se pueden medir para un panel LED con defecto y otro sin defecto mediante imágenes infrarrojas [4]. También H. K. Fu et. al.,

utilizan una cámara de termografía para verificar los resultados de una simulación sobre la distribución de calor en un módulo de diodos emisores de luz, mediante la medición de voltajes directos y transitorios térmicos [1].

La Termografía infrarroja, ver figura. 1 es un método sensible a las propiedades ópticas de las capas de la estructura del LED, sin embargo se acerca al método de medición de voltaje directo para pocas capas, como concluyó S. Natarajan et. al., en un estudio comparativo para medir la temperatura en LED UV por: 1) Espectroscopia Raman, 2) Termografía Infrarroja y 3) Método de medición de voltaje directo. [7]

En el trabajo titulado “Aplicación de la Termografía para la comparación de la eficiencia en LED de potencia” [10] así como del análisis de las conclusiones de las diferentes investigaciones reportadas. T. A. Cortes Aguilar y J. Valadez Aguilar presentan un experimento para la medición de la temperatura en condiciones de estrés térmico para diodos emisores de luz, en la figura. 1 la región de la imagen de color blanco muestra una temperatura por arriba de los 80°C para el LED de prueba.

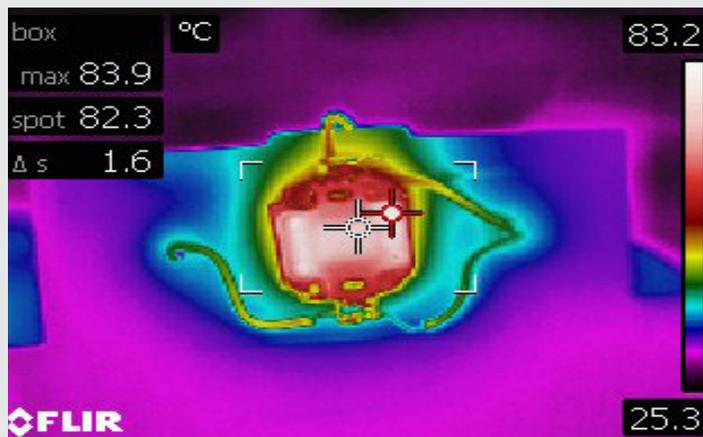


Figura 1. Imagen térmica de LED de 10 W de potencia bajo condiciones de estrés térmico y medición de radiación con emisividad cercana a  $\epsilon=0.95$  sobre el disipador.

En condiciones de operación térmica normal los diodos emisores de luz convierten del 70% al 80% de la energía en calor. Los LED implementados en el prototipo de la luminaria tienen una temperatura máxima de operación de 60°C.

### Relación de Intensidad luminosa contra Temperatura

Para las mediciones experimentales del presente trabajo se utilizó una cámara de termografía marca FLIR modelo E50 considerando, el punto de máxima radiación en estructuras adyacentes con un factor de emisividad cercana a 0.95.

Mediante los datos experimentales adquiridos por termografía infrarroja se graficó en la figura 2, la intensi

dad luminosa normalizada contra la temperatura y se concluye que a partir de la temperatura crítica de 80°C la intensidad luminosa empieza a disminuir, sin embargo el consumo de energía se conserva.

Un enfriamiento efectivo es una de las características más importante de los módulos LED, porque su fiabilidad se reduce significativamente conforme se incrementa la temperatura en la unión.

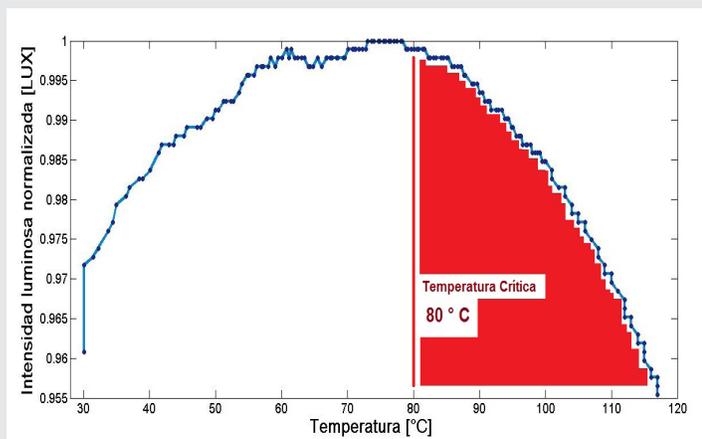


Figura 2. Gráfica de Intensidad luminosa normalizada contra Temperatura.

Si el calor producido por el LED no es disipado efectivamente, la eficiencia en luminosidad y el tiempo de vida se reducen. Park et. al., señalan que bajo estrés térmico el flujo luminoso para electrodos de Au se reduce en un 2.77% contra un 0.09% con electro-plataado [3]. En la presente propuesta de diseño de la luminaria LED se implementó un circuito, que mediante modulación por ancho de pulso reduce la energía suministrada a la matriz de LED cuando la temperatura se acerca al valor crítico de 80°C en el cual se compromete la fiabilidad de la luminaria. En la gráfica de la figura 9, de resultados experimentales la temperatura de reduce en respuesta a una señal PWM.

Por otro lado la eficiencia luminosa se incrementa en un 23.7% cuando la resistencia térmica total se reduce en un 30.5%, según el modelo de disipador propuesto por los autores M. W. Jeong, et. al., [5]. En consecuencia, un aspecto importante en el diseño del prototipo de luminaria LED es el concepto de usar la caja de aluminio del ensamble como elemento de disipación de calor, poniendo en contacto directo la superficie interna de la caja con el LED para transferir rápidamente el calor hacia el exterior.

**MATERIAL Y MÉTODOS**

Para la construcción de la luminaria se utilizaron 12 LED de 5W de potencia [9] con las características técnicas de la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas del LED.

Modelo	Color de emisión	Corriente (mA)	Potencia (W)
SDP03W 64405240	Blanco	800	5.45
Temperatura de color (K)	Voltaje (v)	Flujo Luminoso (lm)	
6000	6.5	180	Mín.
6500	6.8-7.2	240	Avg.
7000	7.5	300	Máx.

**Circuito electrónico**

El circuito electrónico es un prototipo en fase exploratoria, conformado por un sensor de temperatura en grados Celsius LM35, con un rango operación de -55°C a 150°C con una precisión de 0.5°C [11] que envía la señal hacia la entrada analógica A0 del sistema embebido Arduino UNO, ver figura 3.

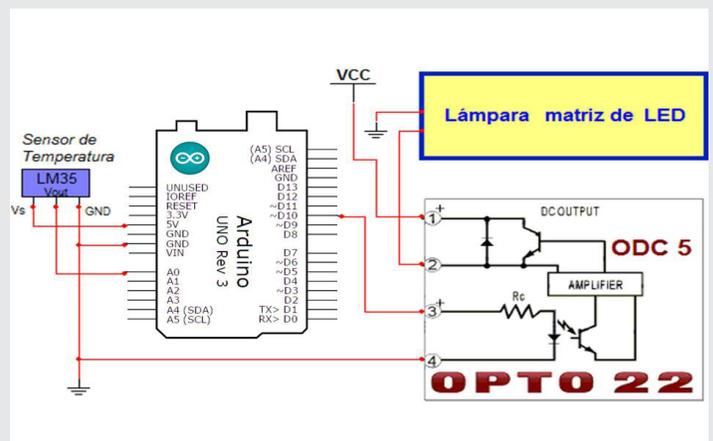


Figura 3. Esquema del circuito electrónico para el control de la luminaria.

A través de la salida del pin 10 del Arduino se envía una señal ON/OFF o modulada por ancho de pulso PWM hacia un relevador de estado sólido modelo ODC5, el cual tiene una entrada lógica 5 VDC y una salida de 5-60 VDC, con un tiempo de encendido de 100µs y de apagado de 750µs [12]. El relevador de estado sólido ODC5 controla la corriente suministrada a la tarjeta electrónica que tiene una matriz de LED

**Programación del sistema embebido**

Para la generación y control de la corriente suministrada hacia los LED de potencia se programó el código de la figura 4, en el sistema embebido Arduino. La función analogWrite genera una señal PWM de 500Hz de frecuencia; suficiente para evitar los problemas de centelleo de la luz LED por persistencia retiniana y dentro de los lapsos de tiempo de encendido y apagado del relevador de estado sólido ODC5.

**Ensamble de la luminaria**

En la Fig. 5 se muestra la vista en explosión del ensamble del prototipo de luminaria LED, la cual está constituida por una base de aluminio que sirve de disipador de calor y como caja para la tarjeta de circuito impreso que tiene soldados los LED de potencia. Encima de la tarjeta de la matriz de LED y atornillada a la caja de aluminio se coloca una pantalla de vidrio para protección de la luminaria.

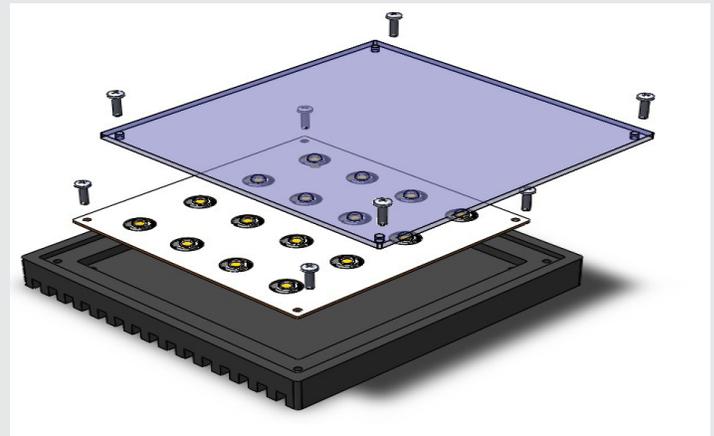


Figura 5. Vista en explosión del ensamble del prototipo de luminaria LED

En la figura 6a se muestra la vista de frente de la luminaria con una matriz de 12 LED de 5W de potencia cada uno. El calor generado por los diodos emisores de luz se transfiere por conducción hacia la cara interior de la caja de aluminio que contiene la tarjeta de circuito impreso y que a su vez sirve como disipador de calor por el lado opuesto; como se puede observar en la fotografía de reverso de la luminaria en la figura 6b.

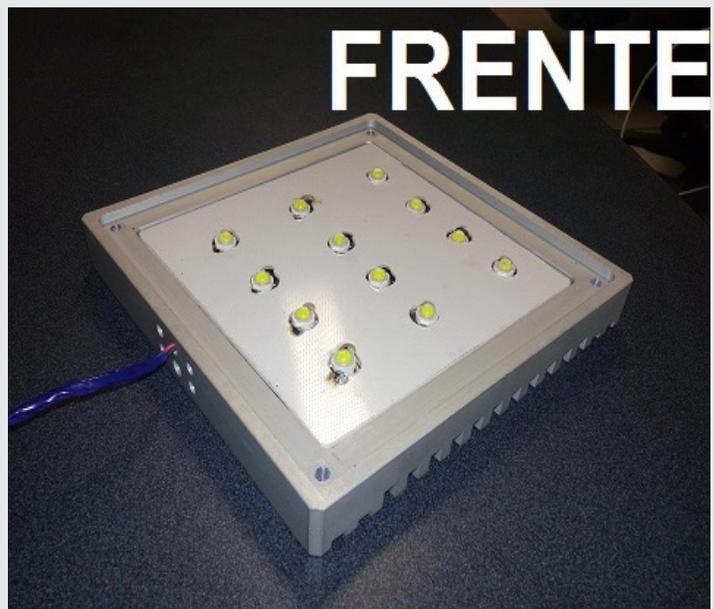


Figura 6a. Fotografías de frente y reverso para la luminaria LED

```

1  int val;
2  int tempPin = A0; // SENSOR INPUT
3  int LED = 10;    // LED OUTPUT
4
5  void setup()
6  {
7    pinMode(LED, OUTPUT);
8  }
9
10 void loop()
11 {
12   val = analogRead(tempPin);
13   float mv = ( val/1024.0)*5000;
14   float cel = mv/10; // Celsius Degrees
15   if (cel >= 55 && cel < 60) {
16     analogWrite(LED, 191);} // PWM 75%
17   else if (cel >= 60 && cel < 65) {
18     analogWrite(LED,127); } // PWM 50%
19   else if (cel >= 65 && cel < 70) {
20     analogWrite(LED,64); } // PWM 25%
21   else if (cel >= 70 && cel < 80) {
22     analogWrite(LED,32); } // PWM 12.5%
23   else if (cel >= 80) {
24     digitalWrite(LED, LOW); } // OFF
25   else {
26     digitalWrite(LED, HIGH); } // ON
27 }
    
```

Figura 4. Código cargado en la tarjeta Arduino UNO durante las pruebas.

Si la temperatura es menor a 55°C la luminaria LED permanece encendida con una corriente continua nominal total de 3.2 A. Pero cuando excede los 80°C la luminaria se apaga, como medida de protección. La señal de modulación por ancho de pulso se configuró de acuerdo a los rangos de temperatura de la Tabla 2.

Los criterios de selección de estos rangos fueron: 1) la temperatura de operación máxima de 60°C recomendada por el fabricante, 2) La temperatura crítica de 80°C que se deduce del análisis de la gráfica de la figura 2, de intensidad luminosa contra temperatura.

Tabla 2. Señal PWM y rangos de temperatura.

Señal PWM [%]	Rango de Temperatura [°C]	
	Mínima	Máxima
75	55	60
50	60	65
25	65	70
12.5	70	80

Cuando la señal PWM disminuye hasta el 12.5% se reduce la corriente y en consecuencia el calor generado por los LED, en estos casos el flujo luminoso también disminuye, sin embargo esta acción de regulación permite que la temperatura en la luminaria se restablezca en un rango óptimo de operación después de un lapso de tiempo.

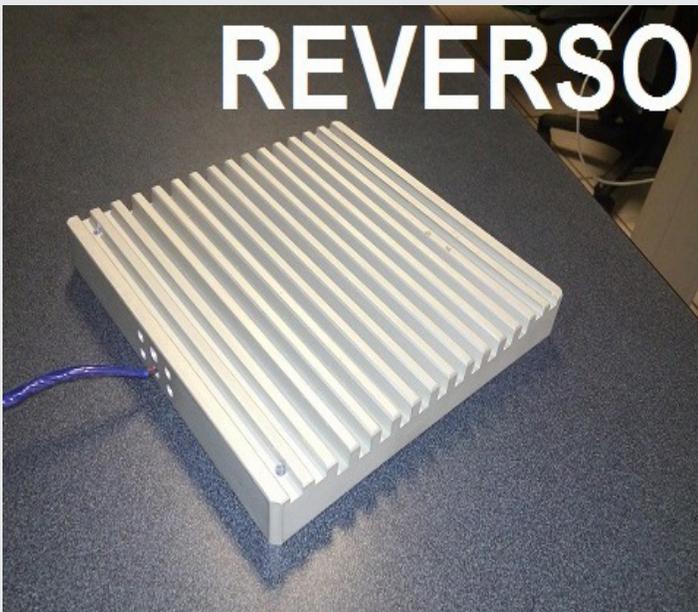


Figura 6b. Fotografías de frente y reverso para la luminaria LED

**RESULTADOS**

Las características técnicas del prototipo de luminaria LED, se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas de la luminaria.

Corriente nominal [A] DC	Voltaje matriz de LED [V <sub>DC</sub> ]	Potencia [W]
3.2	24	76.8
Flujo luminoso [lm]	Peso [kg]	Color de emisión
2,880	0.45	Blanco
Dimensiones [mm]		
Largo	Ancho	Altura
150	150	20

En los experimentos sobre el rendimiento de la luminaria se utilizó el método de termografía infrarroja para observar la capacidad de disipación de calor de la luminaria bajo condiciones experimentales de 27°C en temperatura ambiente y 3600 lm en iluminación ambiental externa incidente. Simulando un escenario de operación menor al valor máximo del rango recomendado de temperatura, sin viento y con radiación lumínica incidente.

Para un suministro de corriente continua nominal en la gráfica de la figura 7 se muestra un incremento en la Temperatura, de aproximadamente 0.453 °C/min.

Con una señal de corriente modulada por ancho de pulso con un ciclo de trabajo del 75%, Fig. 8, se observa que la temperatura no disminuye, por el contrario se incrementa a una tasa de 0.131 °C/min, aunque menor al caso de corriente continua.

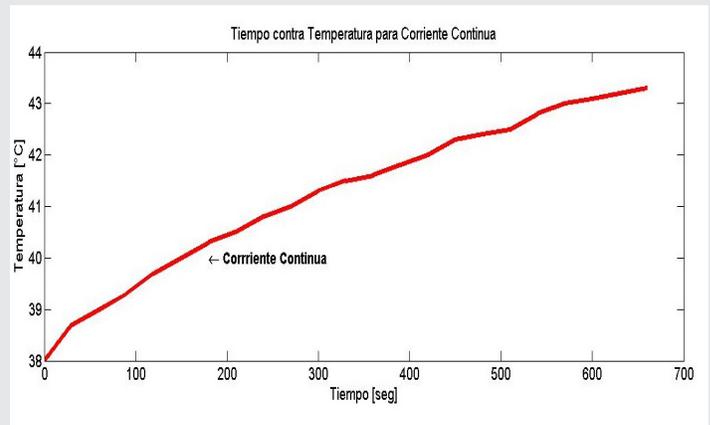


Figura 7. Gráficas de Tiempo contra Temperatura para señal de corriente continua.

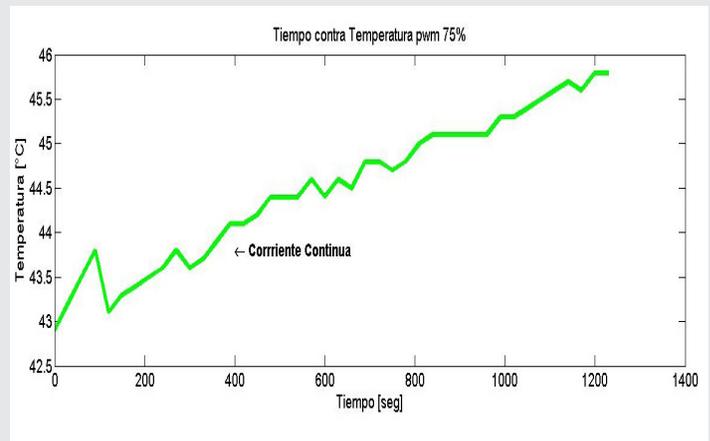


Figura 8. Gráficas de Tiempo contra Temperatura para señal PWM de 75%.

En las gráficas de la figura 9, se observa una reducción de la temperatura con respecto al porcentaje de modulación de la señal de corriente: de -0.060 °C/min para una señal PWM con 50% de ciclo de trabajo, de -0.306 °C/min para una señal PWM de 25% de ciclo de trabajo y de -0.523 °C/min para una señal PWM de 12.5% de ciclo de trabajo.

Se aplicó un modelo de regresión lineal simple sobre los datos de las gráficas de tiempo contra temperatura obteniendo las razones de cambio aproximadas de la tabla 4.

Tabla 4. Datos experimentales para la razón de cambio de temperatura contra tiempo para corriente continua y modulada por ancho de pulso.

Corriente	[m °C/seg]	[°C/min]
Continua	+ 7.5659	+0.453
PWM 75%	+ 2.197	+0.131
PWM 50%	-1.007	-0.060
PWM 25%	-5.1144	-0.306
PWM 12.5%	-8.7318	-0.523

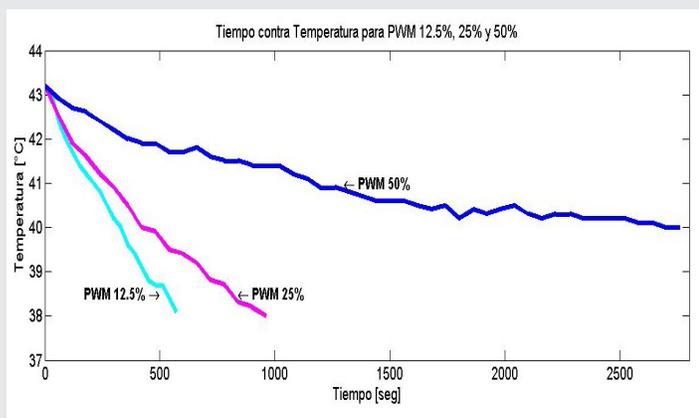


Figura 9. Graficas de Tiempo contra Temperatura para señales PWM de 12.5%, 25% y 50%.

## CONCLUSIONES

Se fabricó una luminaria que utiliza un ensamble de aluminio como disipador y una señal de corriente modulada por ancho de pulso para regular la temperatura y proteger los LED de un daño por operación en condición de calor acumulado excesivo.

Los resultados experimentales obtenidos por termografía infrarroja muestran que en condiciones ambientales no favorables para la disipación de calor, un suministro de corriente continua nominal permite alcanzar el valor de temperatura crítica a razón 0.453 °C/min, a partir de la cual se puede afectar la fiabilidad y el tiempo de vida de los LED de la luminaria.

Una señal de corriente modulada por ancho de pulso con un ciclo de trabajo del 75% ralentiza el incremento de temperatura. En consecuencia, en la programación del sistema embebido se estableció como medida preventiva la temperatura de operación máxima de 60°C recomendada por el fabricante del LED.

Las señales de corriente modulada por ancho de pulso con ciclos de trabajo de 50%, 25% y 12.5%, son las adecuadas para reducir la temperatura en la luminaria y proteger los LED, evitando que alcancen la temperatura crítica de operación, superior a los 80°C.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] H. K. Fu, C.P. Wang, H. C. Chiang, T. T. Chen, C. L. Chen, P. T. Chou. (2013). *Evaluation of temperature distribution of LED module*. *Microelectronics Reliability*, Vol. 53 (4), pp. 554-559.

[2] J. H. Choi, M. W. Shin. (2012). *Thermal investigation of LED lighting module*. *Microelectronics Reliability*, Vol. 52 (5), pp. 830-835.

[3] J. K. Park, J. H. Shin, M- G. Jung, S. J. Suh, (2015). *Manufacture and Evaluation of Light Emitting*

*Diode Package Substrate Using Flexible Printed Circuit Board*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 15 (10), pp. 7578-7581.

[4] M. Maaspuro, A. Tuominen. (2013). *Thermal analysis of LED spot lighting device operating in external natural or forced heat convection*. *Microelectronics Reliability*, Vol. 53 (3), pp. 428-434.

[5] M. W. Jeong, S.W. Jeon, Y. Kim. (2015). *Optimal thermal design of a horizontal fin heat sink with a modified-opening model mounted on an LED module*. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91 (5), pp. 105-115.

[6] N. Narendran, Y. Gu, (2005). *Life of LED-based white light sources*. *Journal of Display Technology*, Vol. 1(1), pp. 167-171.

[7] S. Natarajan, Y. Habtemichael, S. Graham, (2013). *A Comparative Study of Thermal Metrology, Techniques for Ultraviolet Light Emitting Diodes*. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 135 (9).

[8] S. Pimplkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, S. Nakamura, (2009). *Prospects for LED lighting*. *Nature Photonics*, Vol. 3 (4), pp. 180-182.

[9] Snowdragon Industrial CO., LTD, (2016). *LED High Power 5W Series*. Consultado el 14 de Abril de 2016, <http://www.snowdragonledhk.com/new-led-high-power-5w.htm>

[10] T. A. Cortes Aguilar, J. Valadez Aguilar. (2015). *Aplicación de la termografía para la comparación de la eficiencia en LED de potencia*. Conferencia presentada en *The Green Global Forum, Guadalajara, Jalisco, Noviembre 4-6, 2015*.

[11] Opto22 (2012). *Standard DC output Modules. ODC5 datasheet, Form: 450-120920*

[12] Texas Instruments. (1999). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*, LM35 datasheet, SNIS159F, August1999, [Revised January 2016]

[13] CONAGUA (2015), "Reporte del clima de México", Año 5, No. 5, Mayo 2015 pp. 15-19.