

Diseño óptimo de un disipador de calor para luminaria LED mediante moderación modelación computacional

Daniel Cahue Díaz

Posgrado de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Morelia
dcahue@ymail.com

Juan Cristóbal Camacho Arriaga.

Posgrado de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Morelia
Jccmx1@hotmail.com

Resumen: En el presente trabajo se desarrolla una selección de materiales y simulación térmica en el diseño de disipadores de calor para sistemas de iluminación de estado sólido (SSL) mejor conocidos como luminarias LEDs. Se desarrolló un modelo matemático con la capacidad de predecir el comportamiento térmico de la luminaria cuando se encuentra en operación. El modelo matemático fue resuelto mediante un software de distribución libre el cual permite resolver ecuaciones diferenciales mediante el método de elemento finito. Los resultados obtenidos en el modelo matemático planteado fueron validados con los resultados obtenidos mediante experimentación usando imágenes termográficas.

Palabras clave: LEDs, Diseño asistido por computadora, modelación computacional, Selección computacional de materiales.

Optimal thermal design of a LED heat sink through computational modelling

Abstract: This work focuses on optimal materials selection and thermal simulation for the design of heat sinks for LED luminaires, a mathematical model was developed to predict temperature distributions in operating LED lamps. A test case was solved using a noncommercial finite element code and model results were validated against experimental measurements using a thermal imager showing that they are in close agreement with each other.

Keywords: LEDs, aided computer design, computational modelling, material selection.

1. Introducción

Se considera que actualmente existen 30 billones de lámparas en uso en el planeta, consumiendo cerca de 2,650 TWh, esto es cerca del 20% de la energía eléctrica producida a nivel mundial, de ahí la importancia de continuar con los esfuerzos de hacer más eficientes este tipo de dispositivos. En iluminación es posible agrupar las lámparas o bulbos básicamente dentro de tres grandes grupos, de acuerdo a su principio de operación: incandescencia, descarga eléctrica y estado sólido (diodos emisores de luz o por su acrónimo en inglés: LED). Actualmente las dos primeras tecnologías dominan el mercado, con eficiencias máximas de 100-110 lm/W (caso de tecnología de descargas eléctricas). Por otro lado, las fuentes de iluminación de estado sólido son una alternativa para el uso eficiente de la energía, aunque actualmente las lámpara LED tienen eficiencias de alrededor de 40 lm/W, se espera que para el año 2025 los LEDs puedan alcanzar eficiencias que rondan los 200 lm/W, representando una verdadera alternativa de reemplazo de lámparas fluorescentes y contribuir a la solución del problema energético mundial, ya que se considera que si todas las necesidades de iluminación actuales de la humanidad fuesen satisfechas a través de LEDs solamente se consumiría el 4% del total de la energía eléctrica

producida a nivel mundial, lo que representa un ahorro anual de energía estimado de un billón de barriles de petróleo o la energía eléctrica producida por 250 plantas nucleares de gran tamaño, además se evitaría la producción anual de 250 millones de toneladas de gases de efecto invernadero [1]. Otras importantes ventajas del uso de iluminación de estado sólido es que tienen una alta eficiencia energética, larga vida útil (hasta 50,000 horas), su tamaño es más compacto, mayor flexibilidad en cuanto al control de la intensidad lumínica y variaciones de color, entre otras. Además, la iluminación de estado sólido actualmente representa un mercado de 20,000 millones de dólares americanos y es la tecnología en iluminación que más recursos recibe en investigación y desarrollo.

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es una ciencia relativamente reciente y ha encontrado una tremenda aplicación en la solución de diversos problemas de ingeniería en donde intervienen flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas y fenómenos relacionados. El CFD ha demostrado ser una herramienta valiosa en el diseño y análisis de fuentes de iluminación, evitando el trabajo por ensayo y error y reduciendo enormemente el tiempo requerido en el diseño e investigación de nuevos prototipos.

Uno de los principales problemas en el diseño de lámparas LED es la correcta disipación de calor generada por sus diversos componentes electrónicos, la cual se lleva a cabo a través del disipador de calor y en el diseño de disipadores de calor la selección de materiales es fundamental.

2. Selección De Materiales Para Disipadores De Calor

En la correcta selección de materiales utilizados en disipadores de calor para la industria electrónica, la interrelación de cuatro propiedades físicas:

conductividad térmica (λ), resistividad eléctrica (ρ_e), expansión térmica (α) y el módulo de Young (E) juega un papel importante y debe de analizarse adecuadamente, una alternativa es el método de Ashby [2], el cual busca una relación funcional para el desempeño del elemento o componente en consideración, esta función tiene la forma:

$$p = \{F, G, M\} \quad (1)$$

en donde F, G, y M representan respectivamente los requerimientos funcionales, los parámetros geométricos y los índices del material. Para los disipadores de calor el método de Ashby se puede aplicar teniendo en consideración que se busca prevenir capacitancias parasitas entre el chip y el disipador, además de que éste no sea un buen conductor eléctrico, para lo cual se sugieren materiales con alta resistividad eléctrica, $\rho_e > 1019 \mu\Omega \text{ cm}$, pero al mismo tiempo que los materiales propuestos tengan una alta conductividad térmica (λ), matemáticamente se busca maximizar: $p = \{\rho_e, \lambda\}$, para tener el mejor desempeño posible en los disipadores de calor. Otras propiedades a tomar en cuenta en el diseño de disipadores de calor son la expansión térmica (α) y el módulo de Young (E), debido a que los esfuerzos de origen térmico (que son cíclicos) en las lámparas LED son importantes. Para este caso $p = \{\alpha, E, T\}$ en donde T es la temperatura. Después de hacer un análisis de las relaciones funcionales para p y a partir de las figuras 1 y 2 se puede concluir que la mejor selección sería Al, AlN, Al_2O_3 , aleaciones de cobre y zinc y algunos cerámicos. Obviamente otro factor importante a considerar es el costo para tomar la decisión final [3-8].

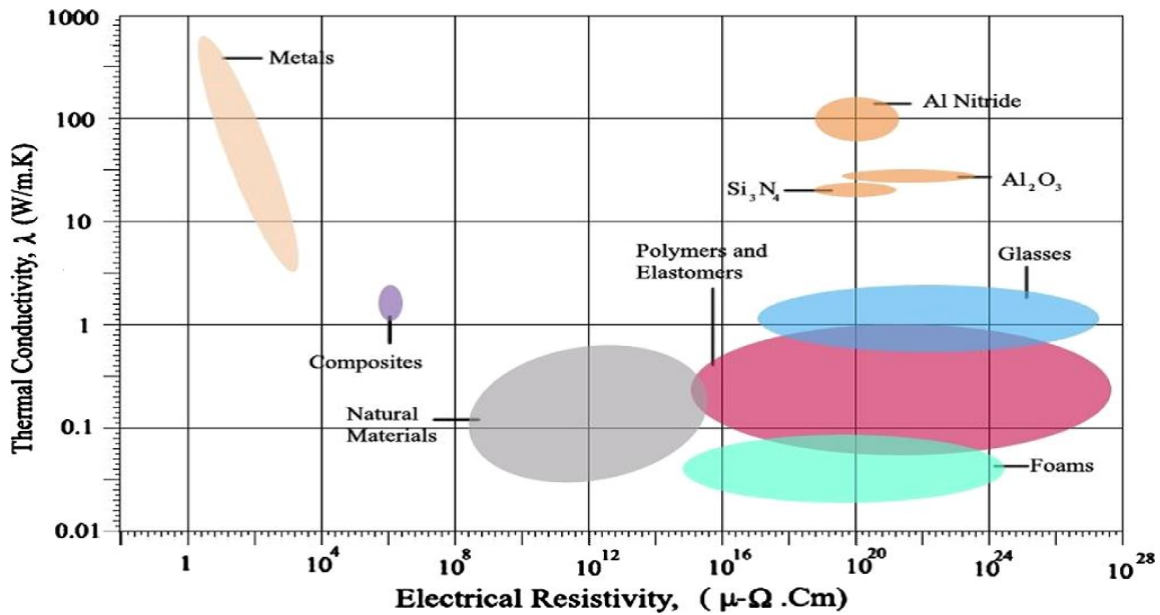


Figura 1. Gráfica que muestra los contornos de conductividad térmica (λ) vs. resistividad eléctrica (ρ_e) para distintas clases de materiales [2].

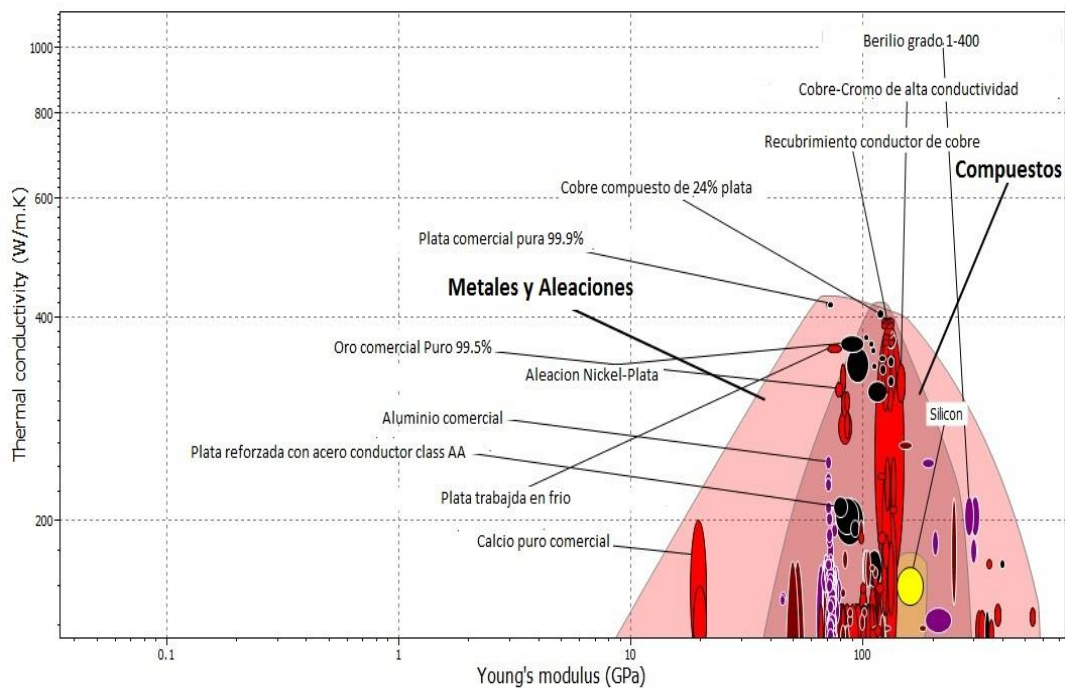


Figura 2. Gráfica que muestra el Módulo de Young (E) vs. Conductividad térmica para distintas clases de materiales.

3. Modelación Computacional

El primer paso en el análisis de la disipación de calor en lámparas LEDs, utilizando la modelación computacional, consistió en el planteamiento de un modelo matemático descriptivo de los mecanismos relevantes de transferencia de calor en las lámparas y el efecto que éstos representan en la correcta operación de dichos dispositivos. Para la formulación del modelo matemático y dominio de solución del problema, se consideró la lámpara mostrada en la figura 3, la cual fue construida exclusivamente como prototipo de análisis para este estudio [9]. La figura 4 muestra las partes que integran la misma y la figura 5 es una imagen CAD del ensamble de dicha lámpara.



Figura 3. Lámpara LED construida para la implementación y validación del modelo matemático de la disipación de calor generado durante la operación de la misma.

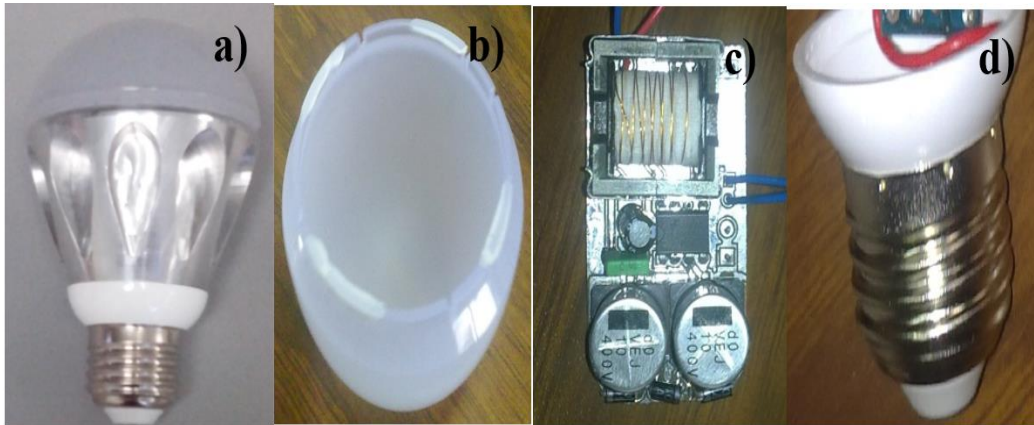


Figura 4. Partes componentes de la lámpara LED utilizada en este estudio: a) Disipador; b) Difusor; c) Driver; d) Socket.



Figura 5. Imagen CAD que muestra el ensamble de los componentes que integran la lámpara LED construida para el estudio.

4. Modelo matemático.

En el planteamiento del modelo matemático para describir la transferencia de calor en las lámparas LED, fue necesario hacer algunas simplificaciones que esencialmente no limitan la precisión y aplicabilidad del mismo. Esto, con el objeto de reducir la complejidad del problema y el esfuerzo computacional

necesario para la solución de las ecuaciones resultantes. Para representar cuantitativamente el proceso de transferencia de calor en las lámparas, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sistema es tratado como un medio continuo.
- Condiciones de estado transitorio
- Flujo incompresible
- Propiedades termo-físicas de los materiales componentes en función de la temperatura.
- Materiales homogéneos.

5. Ecuaciones gobernantes del modelo.

Con base en las consideraciones hechas anteriormente, la representación matemática puede ser determinada de acuerdo al dominio computacional mostrado en la figura 6.

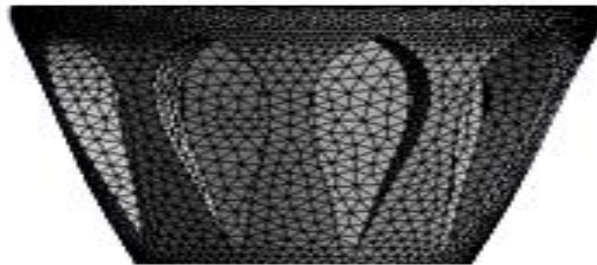


Figura 6. Representación 3D en coordenadas rectangulares del dominio de solución en donde se muestra la malla no uniforme utilizada.

Las ecuaciones que rigen el modelo en coordenadas cartesianas son:

Ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

En donde ρ y \vec{v} son respectivamente la densidad y la velocidad media de masa

Ecuaciones de conservación de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (3)$$

En donde μ , p , g y $\vec{\tau}$ son respectivamente la viscosidad, la presión, la gravedad y el tensor de esfuerzos viscosos, que se representa matemáticamente por:

$$\vec{\tau} = \mu(\nabla \underline{v} + (\nabla \underline{v})^t) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \underline{v}) \cdot \underline{\underline{I}} \quad (4)$$

En donde m es la viscosidad dinámica del gas y t indica la transpuesta del tensor gradiente de velocidad, y $\underline{\underline{I}}$ indica el tensor unidad.

Ecuación de energía:

La ecuación de la energía en su forma de la entalpía total (H) deberá ser resuelta:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_t}{C_p} \nabla H \right) + S_k \quad (5)$$

En donde λ_t y C_p son respectivamente la conductividad térmica y el calor específico a presión constante.

6. Modelación de la transferencia de calor por radiación:

El término fuente, S_k en la ecuación (5) incluirá los términos de radiación, calculados mediante el modelo de ordenadas discretas (DO), el cual es el modelo seleccionado para simular los efectos de transferencia de calor mediante

radiación en el dominio computacional. Para el modelo DO se resuelve la ecuación fundamental de transporte de radiación, RTE (por sus siglas en inglés), para un medio gaseoso que absorbe, emite y disipa radiación en la posición “ r ”, dirigido en la dirección “ s ”, para el número finito de ángulos sólidos discretos, cada uno de ellos asociado con un vector \vec{s} en un sistema global cartesiano (x , y , z), el cual puede ser escrito como:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

Debido a los efectos convectivos, las ecuaciones de flujo deben ser resueltas en forma simultánea con la ecuación de Energía

Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera en la interface sólido-aire (interior y exterior), son:

$$\underline{n} \cdot (\lambda_s \nabla T_s) = -q''_{conv} \quad (7)$$

en donde q''_{conv} es el flujo de calor debido a la convección, de las partes sólidas de la lámpara con sus alrededores, correspondientes a las zonas 1-4 que se muestran en la figura 7 y \underline{n} es un vector unitario normal a las superficies sólidas.

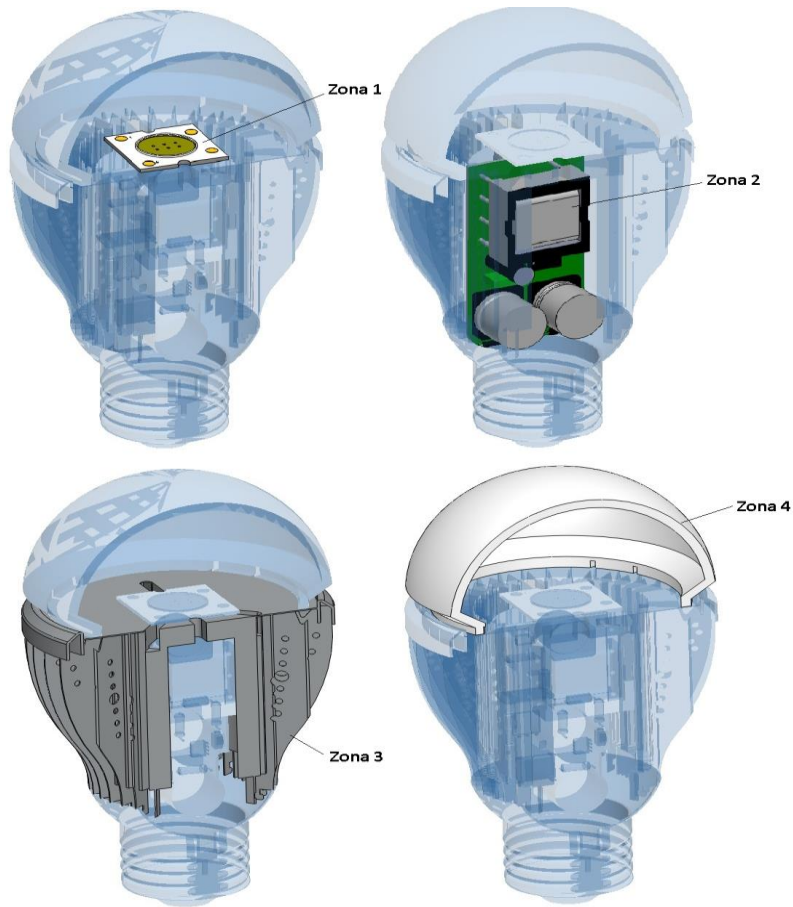


Figura 7. Zonas utilizadas para la prescripción de las condiciones de frontera del modelo matemático [10].

Generalmente, es complicado obtener información detallada sobre la distribución de la temperatura del medio exterior a la lámpara. Por tanto, se tiene que recurrir al uso de expresiones de transferencia de calor como:

$$q_{\text{conv}}'' |_{\text{pared exterior}} = \alpha_{\text{conv}} (T_s - T_a) \quad (8)$$

Para modelar la pérdida de calor por convección hacia el ambiente. Aquí, α_{conv} es el coeficiente convectivo de transferencia de calor y T_a es la temperatura del ambiente.

Debido a que no existe flujo forzado de aire, la convección natural será el mecanismo principal de transferencia de calor. Para este caso, el coeficiente convectivo de transferencia de calor se estimó mediante la expresión:

$$\alpha_{\text{conv}} = C \frac{\lambda_s}{L} \text{Pr}_s^n \left(\frac{g \rho_s^2 L^3 (T_s - T_a)}{\mu_s^2 T_s} \right)^n = C \frac{\lambda_s}{L} \text{Pr}_s^n \text{Gr}^n \quad (9)$$

En donde $C \gg 0.5$ y $n \gg 0.25$.

Además de las condiciones anteriores se prescribieron las típicas condiciones de frontera para las ecuaciones de continuidad, momentum (presión en un punto, condiciones de no deslizamiento, etc.), además de las condiciones iniciales correspondientes.

7. Solución numérica del modelo.

Una vez planteado el modelo matemático, se utilizó un software CAE (Computer Aided Engineering), para obtener la solución numérica del mismo. Primeramente se planteó del dominio de solución, el cual se desarrolló usando un preprocesador. La malla final utilizada como dominio de solución y resultado de realizar un estudio de independencia de la solución con la malla y retroalimentado experimentalmente está formada por 2058499 elementos híbridos no estructurados. El tiempo de cálculos iterativos fue de 100 hrs en un cluster formado por cuatro CPUs (Intel Core i7 y una memoria RAM total de 64 Gb) y utilizando procesamiento en paralelo.

8. Resultados y validación del modelo

En la Fig. 8 podemos observar los contornos estimados de temperatura y la comparación con una imagen termográfica de la lámpara en operación, se puede apreciar una excelente concordancia entre los resultados teóricos y los experimentales. En la figura 9 se muestran los perfiles estimados de temperatura en el driver, en la figura 10 se muestra una imagen termográfica de una vista

superior del driver, particularmente el transformador, en donde se observa también una excelente concordancia de las temperaturas reales con las temperaturas teóricas del driver.

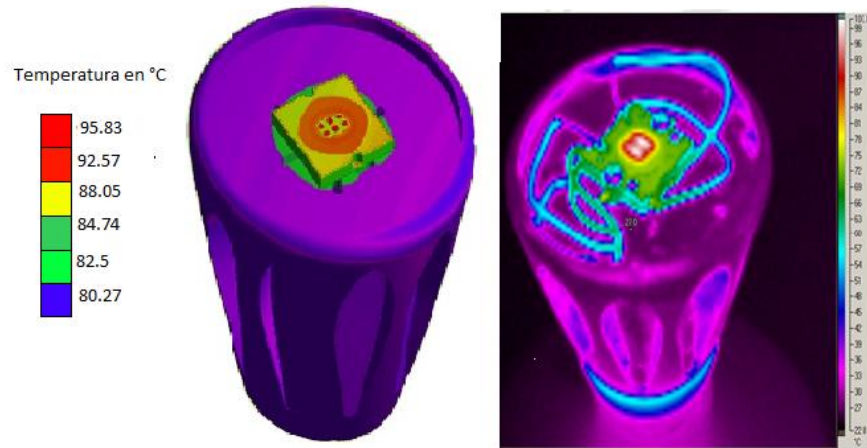


Figura 8. Contornos estimados de temperatura producidos en el disipador y validación con imagen termográfica de la lámpara en operación.

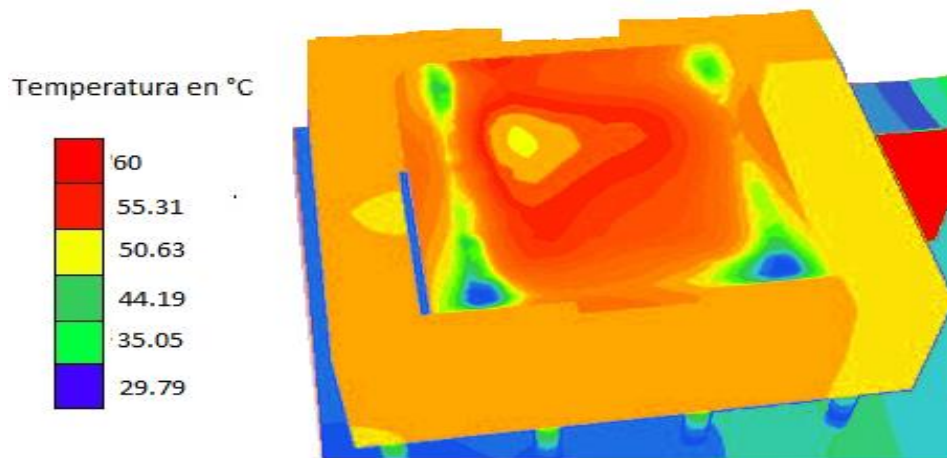


Figura 9. Vista superior de los contornos estimados de temperatura de una sección del Driver.

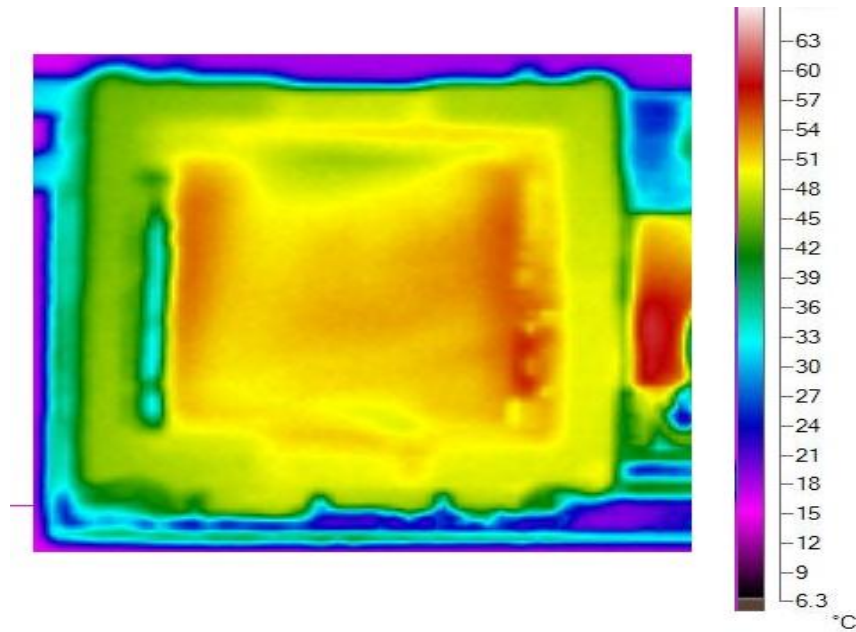


Figura 10. Imagen termográfica del transformador del driver en donde se muestra una buena concordancia con las temperaturas obtenidas mediante el modelo computacional.

9. Conclusiones

Se desarrolló y se resolvió numéricamente un modelo matemático para representar en lo más general posible todos los fenómenos de transporte que ocurren en lámparas LED de bulbo durante su operación. Se utilizó el método de Ashby para seleccionar los materiales óptimos para constituir el disipador de calor. Se demostró que el modelo matemático es predictivo al comparar los resultados teóricos con resultados experimentales y puede ser utilizado como una herramienta útil en el diseño y análisis de nuevas fuentes de iluminación de estado sólido, reduciendo de este modo el trabajo de ensayo y error, muy utilizado hoy en día en el diseño de este tipo de dispositivos.

Referencias

LEDs for Lighting Applications – Patrick Mottier ISTE & Wiley 2009

Ashby, Michael (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th edition ed.). Burlington, Massachusetts: Butterworth-Heinemann

Cheng, H. H., D.-S. Huang, et al. (2011). "Heat dissipation design and analysis of high power LED array using the finite element method." *Microelectronics Reliability*.

Reed, W. G. (2011). "ELECTRICALLY ISOLATED HEAT SINK FOR SOLID STATE LIGHT." Patent.

Tsai, M. Y., C. H. Chen, et al. (2011). "Thermal measurements and analyses of low-cost high-power LED packages and their modules." *Microelectronics Reliability*.

Wan, Z. M., J. Liu, et al. (2011). "Flow and heat transfer in porous micro heat sink for thermal management of high power LEDs." *Microelectronics Journal* 42(5): 632-637.

Yang, L., J. Hu, et al. (2009). "Degradation of high power LEDs at dynamic working conditions." *Solid-State Electronics* 53(6): 567-570.

Yang, S.-C., P. Lin, et al. (2010). "Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes." *Microelectronics Reliability* 50(7): 959-964.

Armando Herrera Velázquez (2012). "Diseño y construcción de un sistema de alimentación conmutado para aplicaciones de iluminación de estado sólido" Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia.

Daniel Cahue Díaz (2013). "análisis mediante modelación computacional de la influencia térmica de las fuentes de alimentación en luminarias LED". Memoria congreso Academia Journals 2013. Intituto Tecnológico de Celaya.

Notas biográficas:



Daniel Cahue Díaz. Estudiante en el posgrado de Ingeniería Mecánica en el Instituto tecnológico de Morelia. Egresado de Ingeniería mecánica en el Instituto tecnológico de Morelia. Ganador del premio a mejor trabajo de investigación en el 2do encuentro de jóvenes investigadores organizado por el Consejo estatal de ciencia, tecnología e innovación (CECTI). Experto en el diseño de sistemas de enfriamiento para sistemas de iluminación de estado sólido (LEDs). Experto en procesos de manufactura de disipadores de calor para iluminación. Amplio conocimiento en iluminación.

Juan Cristóbal Camacho Arriaga. Profesor investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia. Egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Egresado de la maestría en Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Morelia. Obtuvo el doctorado en la universidad de sheffield. Obtuvo su doctorado en simulación de especies químicamente reactivas. Ha trabajado para grande compañías como Panasonic (Japón).



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.