



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



VNIVERSITAT
ID VALÈNCIA

Universitat Politècnica de València - Departamento de Matemática Aplicada

Universitat de València - Facultad de Matemáticas

Máster en Investigación Matemática INVESTMAT

Trabajo Fin de Máster

**Simulación numérica del comportamiento térmico de disipadores
de calor pasivos para iluminación LED mediante software basado
en elementos finitos**

Jorge Omar García Jiménez

Directores:

Pedro Fernández de Córdoba Castellá (UPV)

Ricardo Javier Bendaña Jácome (U. Vigo)

2015/2016

Resumen

El objetivo del trabajo es encontrar posibles mejoras en el diseño de disipadores de calor para obleas LED. Se utilizarán métodos numéricos de elementos finitos para simular la transmisión de calor y encontrar la temperatura de trabajo que es el punto crítico que determina la vida útil del chip LED. Para esto se implementará un software diferente al utilizado inicialmente en el diseño del disipador en [2,3]. Adicionalmente, se realizará una comparación entre el resultado generado por el Solidworks® (simulación nueva) y el generado por Comsol Multiphysics® (simulación original). Finalmente, utilizando una de las herramientas que brinda el programa Solidworks®, herramienta de optimización, se desea analizar las diferentes geometrías, mediante el modelado paramétrico, recomendadas por el programa para buscar el diseño óptimo del disipador de calor.

Abstract

The aim of this work is to find possible improvements in the design of heat sinks for LED chips. A numerical technique known as finite element method will be used to simulate the heat transfer and to find the working temperature which is the critical point that determines the life length of the LED chip. To do this a different design software, from the initially used in [2, 3], will be implemented. Additionally, a comparison between the results generated by the Solidworks® (new simulation) and the ones generated by Comsol Multiphysics® (original simulation) will be performed. Finally, using one of the tools provided by Solidworks® software, optimization tool, we want to analyze the different geometries, using parametric modeling, recommended by the software to find the optimum design of the heat sink.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mis directores del trabajo fin de máster Pedro Fernández de Córdoba Castellá y Ricardo Javier Bendaña Jácome quienes compartieron conmigo sus experiencias y conocimientos en el tema y por su gran contribución profesional.

Deseo agradecer profundamente por todas sus recomendaciones y revisiones a Diego Francisco Alarcón Correa quien me ha conducido durante estos meses con una disposición abierta y muy generosa.

También agradezco al cuerpo docente y compañeros del máster Universitario en Investigación Matemática por sus ayudas y actitud solidaria que me sirvieron durante todo el proceso. Muchas gracias también al Departamento del Chocó en la República de Colombia por darme la oportunidad de vivir esta experiencia y apoyarme con fondos para la investigación.

Y por supuesto a mis familiares y amigos quienes me apoyaron y animaron para que este proyecto llegue a su culminación.

Índice general

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Historia y Actualidad de la tecnología LED	1
1.2. LEDs en la iluminación	1
1.3. Importancia del control de temperatura en una oblea LED	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Interés	3
2. Modelado de transferencia de calor con Método de Elementos Finitos	5
2.1. Introducción al Método de Elementos Finitos	5
2.2. Modelo numérico	7
2.2.1. Conducción	7
2.2.2. Convección	8
2.2.3. Radiación	8
3. Simulación Numérica mediante Elementos Finitos	9
3.1. Introducción a Comsol Multiphysics®	9
3.2. Introducción a Solidworks®	10
3.2.1. Diseño Geométrico: creación de la parte y/o del ensamble.	10
3.2.2. Estudio	12
3.2.3. Optimización o Estudio de Diseño	13
3.3. Resumen de resultados obtenidos con Comsol Multiphysics®	14
3.4. Simulación del disipador de calor utilizando Solidworks®	15
3.4.1. Distribución de Temperatura	16
3.4.2. Gradiente de Temperatura	17
3.4.3. Flujo de Calor	18
4. Análisis de Resultados	21
4.1. Cálculo del error entre resultados simulados y experimentales	22
4.2. Optimización utilizando Solidworks®	24
4.2.1. Optimización del Disipador	24
5. Propuestas de nuevos diseños de disipadores de calor	27
5.1. Propuesta 1	27
5.1.1. Detalles de la geometría	27
5.1.2. Resultados de la simulación	28
5.1.3. Optimización del diseño	28
5.2. Propuesta 2	29

5.2.1. Detalles de la geometría	29
5.2.2. Resultados de la simulación	29
5.2.3. Optimización del diseño	30
6. Conclusiones	31

Índice de figuras

1.1. Ley de Haitz [5].	2
2.1. Una forma -área- mallada con triángulos lineales y cuadráticos [1].	6
2.2. Detalle de una malla utilizada para simulación.	6
3.1. Forma geométrica del disipador planteado por [3].	9
3.2. Mallado generado por Comsol Multiphysics®.	10
3.3. Geometrías del chip LED y del disipador por separado.	11
3.4. Ensamble chip y disipador en Solidworks®.	11
3.5. Pantalla de selección del tipo de estudio.	12
3.6. Características del material empleado.	12
3.7. Ejemplo de aplicación de convección.	13
3.8. Mallado implementado para el estudio.	14
3.9. Distribución de Temperatura [2].	14
3.10. Vista de los planos superior e inferior del disipador [2].	15
3.11. Distribución de temperatura a lo largo del disipador [2].	15
3.12. Distribución de Temperatura en el modelo	16
3.13. Temperaturas en escala discreta y por líneas isotérmicas.	16
3.14. Corte transversal vertical del modelo mostrando la distribución de temperatura	17
3.15. Temperaturas en la cara superior y en la base inferior del modelo.	17
3.16. Gradiente térmico calculado en el modelo.	18
3.17. Gradiente térmico.	18
3.18. Flujo de Calor generado por la potencia calorífica del chip LED.	19
3.19. Flujo de Calor.	19
4.1. Vista frontal y lateral de la bombilla prototipo [3].	21
4.2. Resultados experimentales obtenidos en [3].	22
4.3. Pantalla de definición de Estudio de Diseño.	24
4.4. Resultados del Estudio de Diseño.	25
4.5. Temperatura del escenario óptimo.	25
5.1. Vista planta inferior y general del disipador 1.	27
5.2. Resultados Estudio Térmico disipador 1.	28
5.3. Planteamiento del Estudio de Diseño del disipador 1.	28
5.4. Vista planta inferior y general del disipador 2.	29
5.5. Resultados Estudio Térmico disipador 2.	29
5.6. Planteamiento del Estudio de Diseño del disipador 2	30
5.7. Escenario óptimo del disipador 2.	30

Índice de tablas

4.1. Valores de temperatura crítica.	22
4.2. Valores del error.	23
4.3. Comparación Modelo Original vs. Modelo Óptimo.	26
5.1. Comparación disipador 2 Original vs. disipador 2 Óptimo.	30

Capítulo 1

Introducción

Estamos viviendo en tiempos de gran innovación en la industria de la iluminación. Este campo está presenciando un avance tecnológico acelerado gracias a luminarias basadas en chips semiconductores llamados Diodos Emisores de Luz o LEDs por sus siglas en inglés. Años atrás los LEDs eran de poca potencia y bajos flujos luminosos (Lúmenes), por lo que eran utilizados en indicadores básicamente, sin embargo avances tecnológicos han permitido que las compañías se interesen en este tema y con la ayuda de laboratorios se han hecho esfuerzos para aumentar las eficiencias de los LEDs y sus lúmenes logrando grandes resultados. Hoy en día la invasión de estas luminarias en el campo de la iluminación parece inevitable [6].

1.1. Historia y Actualidad de la tecnología LED

El primer reporte que se tiene del efecto de emisión de luz de un material semiconductor fue en 1907 por Henry Joseph Round y la primera patente de un LED fue hecha en 1929 por el ruso Oleg Vladimirovich Losev, sin embargo el descubrimiento fue olvidado. Solo hasta 1962 los investigadores de General Electric, Nick Holonyak y S. F. Bevacqua se encargaron de crear el primer diodo emisor de luz roja [6].

Desde entonces los desarrollos se han acelerado. En 1968 un LED producía escasos 0.001 lúmenes (lm) de luz roja. En la actualidad, los LEDs de alto brillo de luz blanca comerciales, generan más de 100 lm y en experimentos de laboratorio, combinando varios LEDs en un chip, se ha llegado a 1,100 lm [6].

El análisis de los datos de este acelerado desarrollo a llevado a hacer predicciones como la “Ley de Haitz”, que predice que el flujo luminoso generado por LEDs se incrementa 20 veces por década mientras que el costo de los LEDs decrece 10 veces en el mismo periodo de tiempo [6].

1.2. LEDs en la iluminación

La iluminación eléctrica consume alrededor del 19% de la electricidad producida a nivel mundial y dos tecnologías importantes dominan el mercado, la incandescente y la de descarga eléctrica. La mayor eficiencia que estos sistemas han alcanzado, después de muchos años en el mercado, es 100-110 lm/W [6], mientras que los LEDs con el crecimiento constante de sus eficiencias luminosas se plantean como una solución innovadora que implicaría un ahorro de energía significativo y también

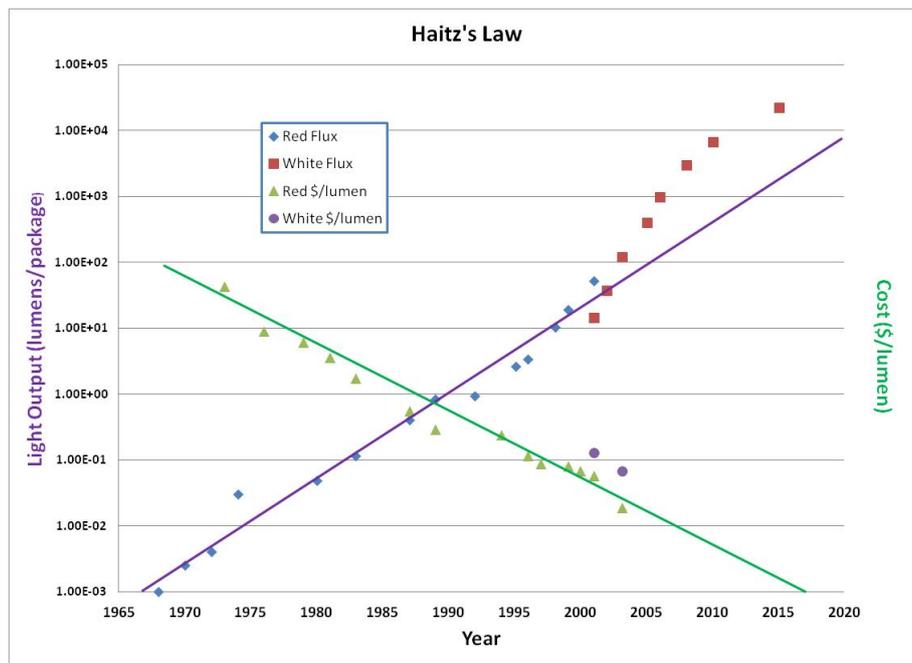


Figura 1.1: Ley de Haitz [5].

una gran reducción de emisiones de CO_2 .

Los tipos de bombillas utilizados hoy en la iluminación son poco eficientes dado que la proyección de luz es obtenida como un residuo de la producción de calor, es decir, el consumo de energía de estos elementos se concentra en la generación de calor. Algunos tipos de bombillas utilizadas como las fluorescentes usan gases tóxicos, como el mercurio, para cumplir con su funcionamiento, lo cual es una desventaja por su carácter contaminante.

Por otro lado los LEDs de luz blanca para sistemas de iluminación tienen numerosas ventajas cuando se comparan con luces tradicionales:

- mayor eficiencia energética de los sistemas de iluminación;
- reducción de tamaño del equipo;
- mayor tiempo de vida y por tanto menos mantenimiento;
- mayor flexibilidad y control del nivel de luz y variación del color;
- bajo consumo de potencia eléctrica (favoreciendo sistemas autónomos con batería);
- no hay emisiones ultravioletas ni infrarrojas (conservación, en museos) [6].

1.3. Importancia del control de temperatura en una oblea LED

Gracias a las ventajas mencionadas anteriormente, los LED han llamado la atención del mundo industrial. Sin embargo, se presenta un problema térmico en el uso de LEDs de alta potencia ya que un alto porcentaje de la energía utilizada es transformada en calor [11]. Este problema es uno de los principales obstáculos en la implementación de LEDs para aplicaciones de alta potencia.

La vida útil de un LED depende fuertemente de las condiciones en las que opera, siendo los factores principales:

- la temperatura de unión, que es la temperatura entre los semiconductores p y los semiconductores n que forman el diodo.
- la corriente aplicada, la cual será constante gracias a los *drivers* utilizados para controlar la corriente.

La temperatura en la unión juega un rol mayor en la confiabilidad de los LEDs. Al colocar el LED en un sistema de iluminación, la vida útil puede ser dramáticamente reducida sin un manejo apropiado de la temperatura [6].

Al trabajar con LEDs individuales no existe este problema, pero al crear obleas LEDs que tienen más de cien veces el flujo de los LEDs iniciales [7], como es el caso de los LEDs de alta potencia, se manifiestan altas temperaturas que acortan la vida útil de los LEDs. Es por eso que el uso de disipadores en la implementación de LEDs de alta potencia es crucial para poder garantizar estabilidad y confiabilidad.

1.4. Objetivos

En este trabajo fin de máster nos proponemos los siguientes objetivos:

1. Simular el comportamiento térmico de disipadores de calor para LEDs mediante software basado en elementos finitos Solidworks®.
2. Hacer comparación de resultados entre dos programas específicos: Solidworks® y Comsol Multiphysics® con mediciones reales obtenidas en laboratorio mediante el análisis del error.
3. Encontrar posibles mejoras a disipadores de calor mediante la herramienta de optimización del programa Solidworks®.

1.5. Interés

Nuestro interés es ver cómo varían los resultados obtenidos por los programas Solidworks® y Comsol Multiphysics® y estudiar cómo aplican estos programas los métodos de elementos finitos para resolver problemas de transferencia de calor para poder hacernos una idea clara tanto práctica como teórica de cómo tener simulaciones numéricas más exactas o aproximadas a la realidad.

Analizar el error y comparar nuestros resultados con los obtenidos en laboratorio para determinar qué tan cercanos estamos de la realidad.

También es de interés poder mejorar los diseños de disipadores de calor comerciales, con el objetivo de minimizar el consumo de materiales durante la fabricación, manteniendo los estándares de calidad en cuanto a control de temperatura de las obleas LED, gracias a la simulación por métodos de elementos finitos.

Capítulo 2

Modelado de transferencia de calor con Método de Elementos Finitos

En las siguientes secciones analizaremos el comportamiento térmico de disipadores comerciales para obleas LED y buscaremos optimizarlos. Por tanto, veremos algunos conceptos previos para entender cómo se modela matemáticamente el problema y cómo se encuentra la solución numérica al problema planteado.

2.1. Introducción al Método de Elementos Finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para encontrar soluciones de ecuaciones diferenciales parciales de forma aproximada el cual provee un proceso estandarizado para convertir principios de la energía -o ecuaciones diferenciales que gobiernan un sistema- en un sistema matricial de ecuaciones [1].

El concepto básico del MEF es reemplazar cualquier forma compleja por la unión (o sumatorio) de un gran número de formas simples (como triángulos) que son combinadas para modelar la parte original y que son llamados “Elementos Finitos” [1].

El método permite obtener una solución aproximada sobre el dominio en el que gobiernan ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que describen el comportamiento físico del problema partiéndolo en un número de “elementos finitos”. A la partición del dominio se le puede llamar discretización. Cada elemento está formado por unos puntos importantes llamados “nodos”. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos. Teniendo en cuenta las relaciones de adyacencia, al conjunto de nodos se le llama “malla”.

Las relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se pueden interpretar como un sistema de ecuaciones lineales. La matriz generada por este sistema de ecuaciones se llama “matriz de rigidez”. A mayor número de nodos mayor número de ecuaciones del sistema.

El MEF es muy usado gracias a la facilidad de introducir dominios de cálculo complicados en dos o tres dimensiones. El método también es adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos computacional, o de campo electromagnético. Cuando el MEF es aplicado a un campo específico de análisis (como análisis de esfuerzos, térmico o vibracional) frecuentemente se le llama Análisis de Elementos Finitos (AEF) [1].

El MEF tiene la propiedad de ser convergente; cuanto más finos sean los elementos finitos, la solución del método converge más rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. También el

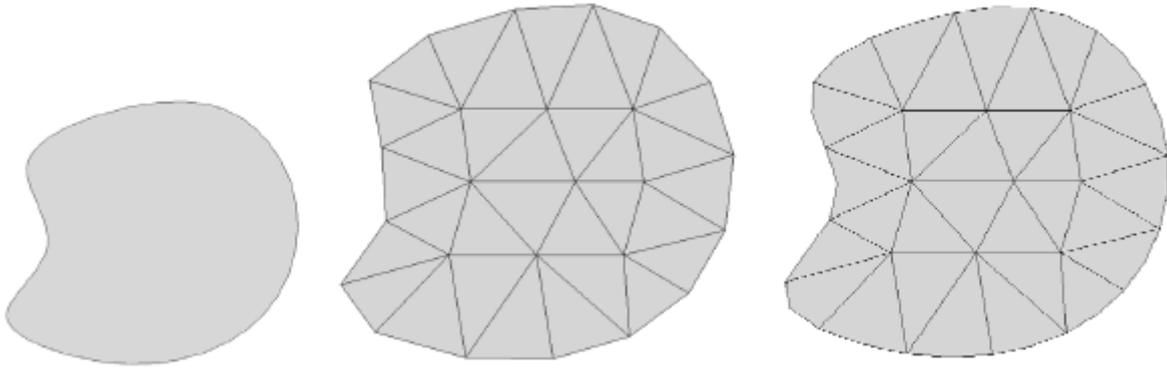


Figura 2.1: Una forma -área- mallada con triángulos lineales y cuadráticos [1].

error geométrico de frontera puede ser reducido a cualquier nivel deseado incrementando el número de elementos finitos [1].

Los pasos para resolver un problema de ecuaciones diferenciales mediante la aproximación de la solución por elementos finitos son en general los siguientes [8]:

1. El sistema de ecuaciones del problema (o la ecuación) y sus condiciones iniciales y de frontera se deben definir con mucho cuidado para asegurarse de que el problema esté bien formulado.
2. Escoger el tipo de elemento para definir las funciones de aproximación de la solución.
3. Crear la malla. El dominio de variables independientes (generalmente dominio espacial) se divide en subdominios, también conocidos como “elementos finitos”. Esta malla debe refinarse adecuadamente en regiones donde se esperan grandes cambios en la solución y también debe permitir que las condiciones de frontera sean impuestas correctamente.

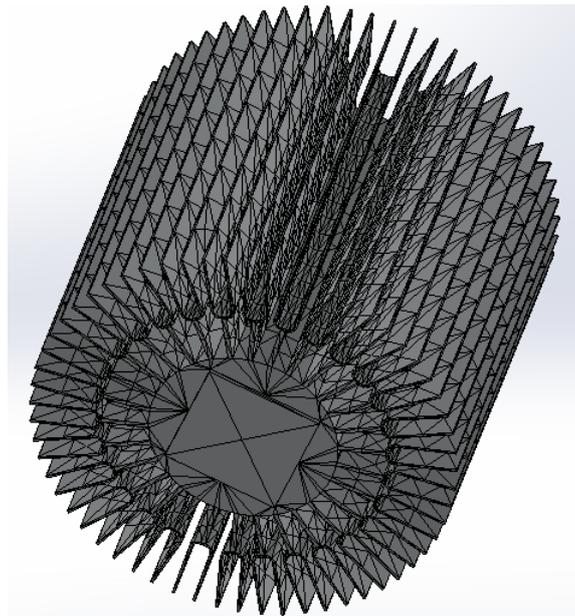


Figura 2.2: Detalle de una malla utilizada para simulación.

4. Por medio de un algoritmo, construir un espacio vectorial de dimensión finita asociado a la partición anterior, llamado espacio de elementos finitos. La solución numérica obtenida por el MEF es una combinación lineal en este espacio vectorial. Este mismo algoritmo calcula la proyección del problema variacional original sobre el espacio vectorial construido anteriormente. Esto da lugar a un sistema con un número de ecuaciones finito, generalmente con un número grande de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido. El algoritmo también calcula numéricamente la solución del sistema de ecuaciones.
5. Analizar el error para ver si se ha convergido o si se necesita refinar más la solución.

Este procedimiento convierte un problema de cálculo diferencial en un ejercicio de álgebra lineal. Este problema se diseña sobre un espacio vectorial de dimensión no finita, pero que puede resolverse proyectándolo sobre un subespacio de dimensión finita, con un número finito de ecuaciones (típicamente de miles incluso centenares de miles de ecuaciones).

La discretización en elementos finitos permite crear un algoritmo de proyección sencillo, y además logra que la solución por este método sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos.

2.2. Modelo numérico

Hay tres tipos diferentes de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Para que ocurra transferencia de calor debe existir una diferencia de temperaturas y en ese caso el calor siempre es transferido en la dirección en la que la temperatura decrece. Entonces la temperatura es un escalar y el flujo de calor es un vector [1].

En el caso de nuestro disipador se tiene simetría de traslación a lo largo de un eje. Esta configuración facilita su producción industrial en masa [3].

2.2.1. Conducción

Se presenta dentro de las fronteras de un cuerpo por la difusión de su energía interna [1]. La teoría matemática sobre la conducción de calor fue desarrollada por Joseph Fourier a principios del siglo XIX. La ley de Fourier unidimensional es

$$\hat{q}_x = -k \frac{dT}{dx},$$

donde q_x es el flujo de calor, k es la **conductividad térmica** del material y T es la temperatura. En tres dimensiones la ley de Fourier queda expresada así:

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} T.$$

Además, la ecuación de la energía térmica se define de esta forma:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}, \quad (2.1)$$

donde ρ es la densidad, C_P es el calor específico, ambos constantes y \dot{q} es el valor de la potencia por unidad de volumen de una fuente de calor homogénea [9].

2.2.2. Convección

Ocurre cuando un gas o líquido fluye por una superficie sólida la cual tiene temperatura diferente de la del fluido [9]. La expresión utilizada en este caso es la **Ley de enfriamiento de Newton**

$$q = hA\Delta T,$$

donde q es la tasa de transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, A es el área sobre la cual ocurre la transferencia de calor y ΔT es la diferencia de temperatura entre el sólido y el fluido. h no es una propiedad del material pues depende no solo de la temperatura y la presión sino de factores como la geometría, el régimen hidrodinámico (laminar o turbulento) y la rugosidad de la superficie del sólido, es llamada **coeficiente de transferencia de calor por convección** [9].

La siguiente expresión utilizada en el análisis de la transferencia de calor al aire es la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2.2)$$

donde ρ es la densidad del aire que rodea el disipador y \vec{v} es su velocidad. También se usa la ecuación de energía [4]:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} - \rho \vec{g}, \quad (2.3)$$

donde P la presión, t es el tiempo, y μ la viscosidad dinámica del aire. En nuestro caso, tomaremos la gravedad \vec{g} como paralela al eje z . Adicionalmente el disipador de calor cumple la siguiente condición: [2]

$$\nabla^2 T = 0.$$

debido a que nos interesa realizar un estudio en estado estacionario.

2.2.3. Radiación

Ocurre a través del intercambio de ondas electromagnéticas o fotones entre la superficie de un cuerpo y otro [10]. En la frontera, para una superficie de anodizado negro con una alta emisividad ($\varepsilon \geq 0,8$), se puede despreciar el efecto de la irradiancia, que es el flujo de potencia por unidad de área (W/m^2) [2], y de ahí que el flujo de salida q_s se describa por la **ley de Stefan-Boltzmann**:

$$q_s = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2.4)$$

donde ε es la emisividad del aluminio, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta del disipador de calor.

Capítulo 3

Simulación Numérica mediante Elementos Finitos

En este capítulo se utilizarán dos programas para la solución numérica del problema propuesto. Éstos son Comsol Multiphysics® y Solidworks®. Cabe recalcar que Comsol Multiphysics® fue utilizado en [2] para analizar el problema del comportamiento térmico del disipador planteado por [3]. En este capítulo se hará un resumen de los resultados de ese estudio y posteriormente se desarrollará el análisis para el mismo disipador por medio de Solidworks®, de manera que se puedan comparar los resultados.

El dispositivo está diseñado para disipar el calor generado por un chip LED de $50W$ de potencia. Este chip es simulado como una placa cuadrada de $25mm$ de lado y $1mm$ de espesor, el cual proporciona un flujo de calor constante al disipador. Las dimensiones generales del disipador en estudio son: una altura de $10cm$, diámetro exterior de $9cm$ y núcleo cilíndrico interno de diámetro $4cm$ [3]. En la figura 3.1 se observa la forma geométrica vista de planta.

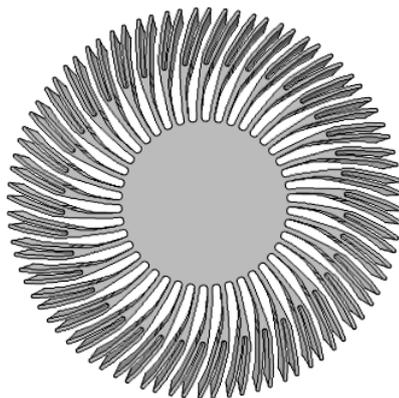


Figura 3.1: Forma geométrica del disipador planteado por [3].

3.1. Introducción a Comsol Multiphysics®

En forma general, los siguientes aspectos fueron tenidos en cuenta en [2] para la simulación del problema propuesto.

Espacio de trabajo: el disipador es un objeto tridimensional, por tanto la simulación del problema fue ejecutada en un ambiente 3D.

Geometría: la forma del disipador fue importada mediante la herramienta de importación del programa que permite insertar formas diseñadas en diferentes softwares de diseño.

Materiales: se utilizaron las propiedades correspondientes al aluminio anodizado negro (Al 16061).

Física: se especifican los fenómenos físicos influyentes en el estudio. Principalmente, se trabajó con las ecuaciones de transferencia de calor estudiadas en el capítulo anterior. Se tuvo especial atención en la temperatura máxima alcanzada en el chip LED por las razones expuestas anteriormente (vida útil de las Obleas LED).

Malla: proporcionada por el programa. En la figura 3.2 se muestra la malla generada.

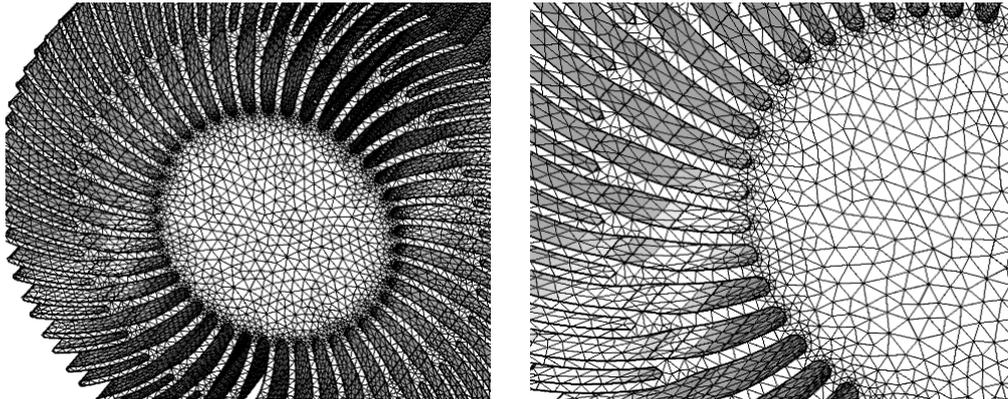


Figura 3.2: Mallado generado por Comsol Multiphysics®.

Tipo de Estudio: se efectuó un análisis estacionario lo que implica que no se tiene en cuenta la evolución de la temperatura en el tiempo. Comsol Multiphysics® tiene los dos tipos de estudio disponibles.

3.2. Introducción a Solidworks®

Solidworks® es un programa de diseño muy completo que permite plasmar cualquier tipo de geometría que se desee estudiar. Es utilizado por ingenieros y diseñadores específicamente para analizar los efectos de fenómenos físicos sobre un elemento. Incorpora una interfaz gráfica sencilla y práctica de utilizar. Básicamente, se puede resumir un diseño en Solidworks® en tres partes principales que serían: Diseño Geométrico, Estudio y Optimización. A continuación, se detallará en qué consiste cada una de estas partes.

3.2.1. Diseño Geométrico: creación de la parte y/o del ensamble.

El programa está pensado para iniciar con la inserción de la geometría del dispositivo a analizar para crear su versión digital. Para esto Solidworks® trabaja fundamentalmente en dos secciones. La primera sección se llama **PARTE**, en la cual se diseñan individualmente los componentes del modelo. Luego, el programa, mediante la segunda sección llamada **ENSAMBLE**, permite crear modelos complejos a partir de la unión de las partes sencillas creadas anteriormente. Es decir, lo primero que se debe realizar es la creación del archivo digital del modelo sobre el cual se estudiará el efecto de un fenómeno físico específico.

Una de las ventajas que presenta el programa es la creación de modelos 3D a partir de geometrías básicas diseñadas en 2D. Esta implementación se puede realizar en la sección **PARTE** mediante el

uso de las diversas herramientas de diseño del programa. Posteriormente, al crear por separado las partes que conforman nuestro dispositivo de análisis, se procede a integrarlas en un solo elemento tridimensional, mediante la sección **ENSAMBLE**, que permite modelar relaciones entre partes como movilidad o rigidez entre ellas, obteniendo un modelo más elaborado y muchas veces complejo de nuestro dispositivo.

Para el primer modelo de disipador propuesto se crearán dos partes. La primera corresponde al chip LED con las especificaciones anteriormente detalladas, es decir, un cuadrado de $25mm$ de lado con un espesor de $1mm$. La segunda corresponde al disipador como tal. En la figura 3.3 se muestran las partes básicas que componen el dispositivo.

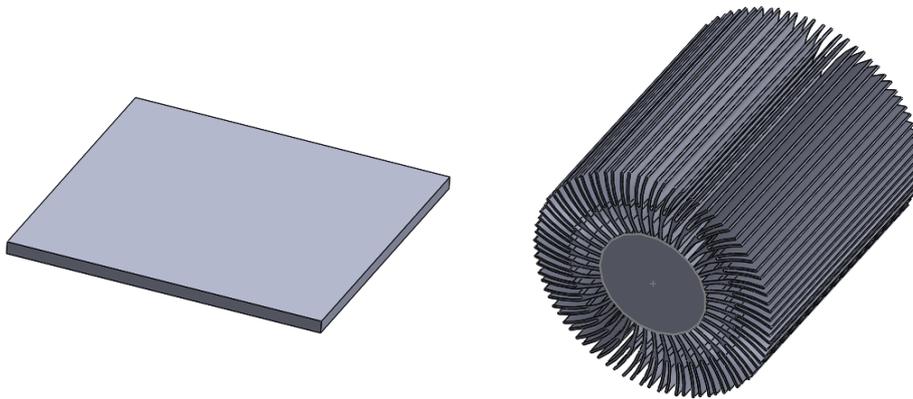


Figura 3.3: Geometrías del chip LED y del disipador por separado.

Finalmente, por medio del módulo **ENSAMBLE**, unimos las partes colocando el chip LED en la base del disipador. En la figura 3.4 se muestra el ensamblaje. Una vez conformado nuestro ensamblaje, se define el estudio que se desea realizar, eligiendo uno de los estudios ofrecidos por el paquete computacional.



Figura 3.4: Ensamblaje chip y disipador en Solidworks®.

3.2.2. Estudio

El proceso de estudio se realiza mediante el complemento del programa llamado **Simulación** y se lleva a cabo siguiendo los pasos que se enumeran a continuación:

1. **Definir el tipo de Estudio**, el programa ofrece una gran variedad de estudios, por ejemplo, estudios de frecuencia, pandeo, fatiga, etc. En nuestro caso, para analizar la transferencia de calor a través del dispositivo se elige un estudio térmico.

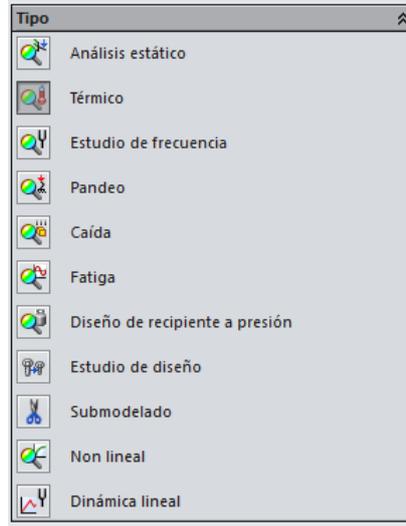


Figura 3.5: Pantalla de selección del tipo de estudio.

2. **Ingresar tipo de material**, Solidworks® tiene una extensa base de datos de materiales con sus propiedades, solo hay que escoger el indicado según corresponda con nuestra realidad. En nuestro caso el material implementado es aluminio aleación 1060.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.7e+010	N/m ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción	68935600	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	27574200	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-005	/K
Conductividad térmica	200	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 3.6: Características del material empleado.

3. **Ingresar tipos de contactos**, en el análisis térmico interesa saber cómo entran en contacto las partes de nuestro dispositivo debido a que cambios de material afectan la transferencia

de calor. Los contactos pueden ser especificados con resistencias, sin resistencias o aislados completamente. Para la unión entre el disipador y el chip LED se definió una resistencia térmica. Dicha resistencia fue establecida como $4 \times 10^{-6} \frac{K \cdot m^2}{W}$ que corresponde a la existencia de una lámina de grafito entre las partes.

4. **Ingresar cargas**, en nuestro caso cargas térmicas. Aquí se detalla todo lo que afecte el flujo de calor activamente. Como ya hemos explicado, para un estudio térmico se puede incluir la convección, la conducción, la radiación, la potencia de calor generada por el chip LED y/o flujos de calor externos. Para este disipador se definieron los siguientes parámetros:
 - Convección: $5,25 \frac{W}{m^2 K}$.
 - Potencia de calor: $50W$ (correspondientes al chip LED).

A la hora de definir la convección, únicamente se aplica a las regiones expuestas al aire. En la figura 3.7 se puede ver un ejemplo de la definición de la convección donde en verde se indican las caras expuestas al aire circundante.

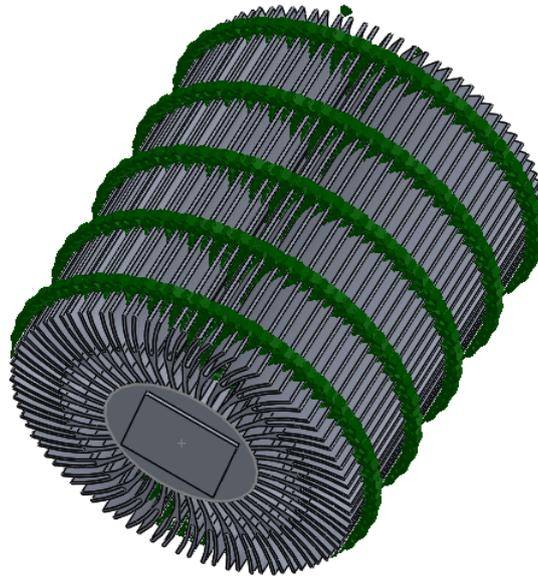


Figura 3.7: Ejemplo de aplicación de convección.

5. **Generar la malla de elementos finitos**, el programa nos permite seleccionar fácilmente el tamaño de los elementos finitos, sin embargo, se sugiere utilizar la malla que el programa define por defecto. En la figura 3.8 se muestra el mallado implementado para el estudio.
6. **Ejecutar el programa** en busca de la solución al problema. En nuestro caso la distribución de temperaturas desde el chip hasta el disipador en su totalidad.

3.2.3. Optimización o Estudio de Diseño

Después de obtener una solución puntual al problema de comportamiento físico (temperatura en la región del LED), podemos hacer un estudio de diseño por medio de una parametrización de valores importantes de la geometría del dispositivo en estudio. Gracias a la herramienta de optimización de Solidworks® se genera la solución al problema térmico de varias geometrías simultáneamente,



Figura 3.8: Mallado implementado para el estudio.

permitiendo escoger la solución que mejor se acerque a los objetivos planteados. Esta herramienta la utilizaremos en el próximo capítulo y en su momento ahondaremos más en el tema.

3.3. Resumen de resultados obtenidos con Comsol Multiphysics®

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por [2]. Hay que resaltar que los resultados que se exponen son los obtenidos para el estudio de transferencia de calor utilizando el programa Comsol Multiphysics®.

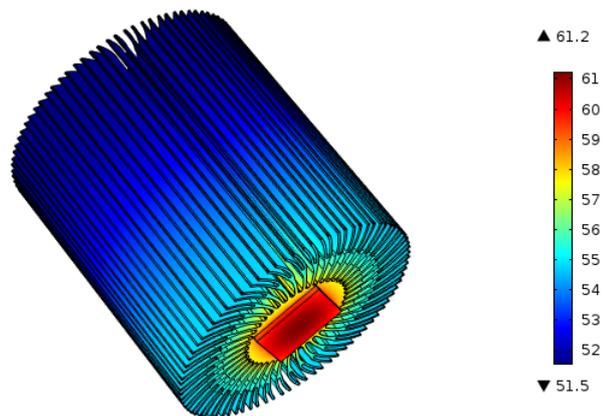
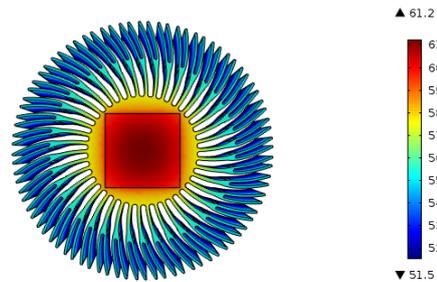


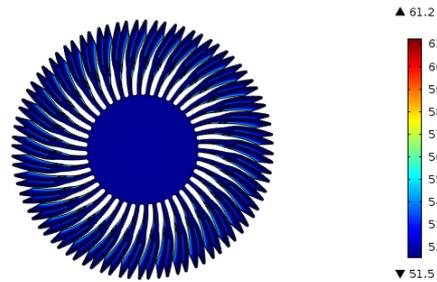
Figura 3.9: Distribución de Temperatura [2].

Los resultados en la figura 3.9 permiten concluir que el disipador satisface la condición sobre la temperatura de trabajo y la mantiene en un rango de operación aceptable. La temperatura máxima y mínima, mostradas en la escala del gráfico son $61,2^{\circ}C$ y $51,5^{\circ}C$ respectivamente. Para la realización de dichas simulaciones se definió la temperatura ambiente de $30^{\circ}C$.

Se muestran en la figura 3.10 las gráficas correspondientes a la distribución de la temperatura en las bases, inferior y superior, del disipador.



(a) Vista inferior del disipador.



(b) Vista superior del disipador.

Figura 3.10: Vista de los planos superior e inferior del disipador [2].

Se observa que en las bases la distribución de la temperatura se puede asumir con un comportamiento esencialmente radial. La figura 3.11 muestra la distribución a través de un corte vertical en el disipador, se observa que dicho comportamiento también se presenta a lo largo del disipador.

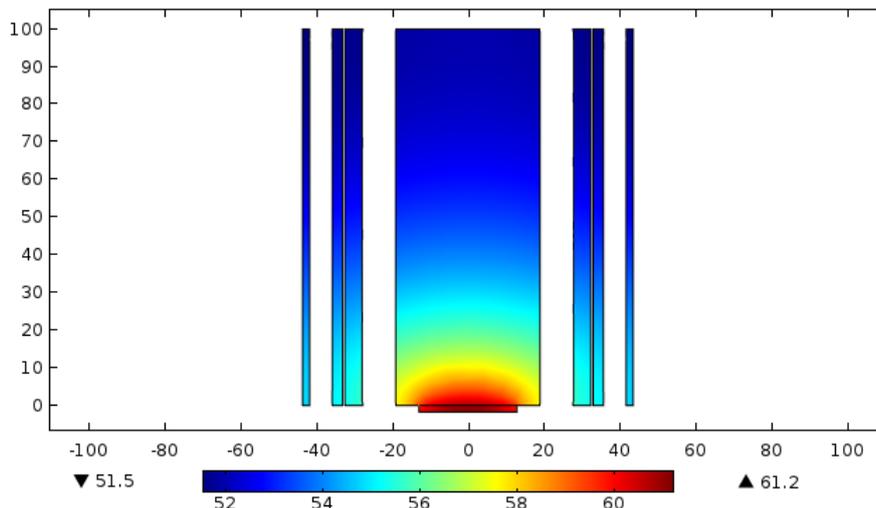


Figura 3.11: Distribución de temperatura a lo largo del disipador [2].

3.4. Simulación del disipador de calor utilizando Solidworks®

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el programa Solidworks®, y se explica los valores de las condiciones iniciales importantes tenidas en cuenta para la modelación del problema. Adicional a las gráficas de temperatura, se aprovechó el programa para obtener gráficas del Gradiente

Térmico y del Flujo de Calor que son variables que forman parte de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico de Transferencia de Calor según lo visto en el capítulo 2.

3.4.1. Distribución de Temperatura

Como el objetivo principal es controlar la temperatura de trabajo del chip LED, deseamos observar cuál es la temperatura máxima en nuestro modelo. El resultado obtenido se muestra en la figura 3.12 donde se observa una temperatura máxima de trabajo del chip LED de $63,85^{\circ}\text{C}$ y una temperatura mínima en el disipador de $56,03^{\circ}\text{C}$.

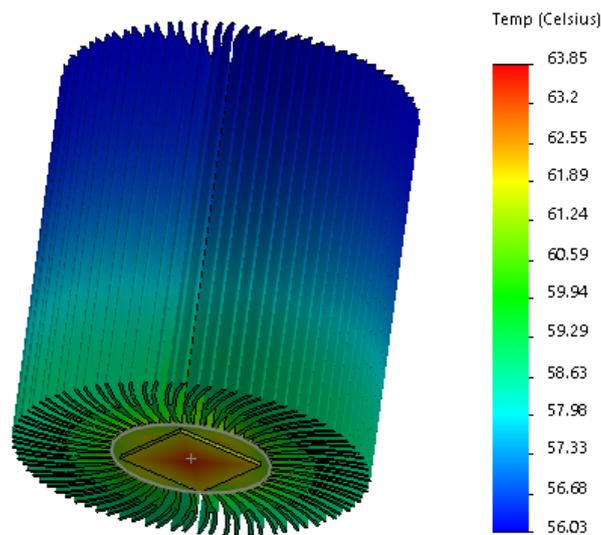


Figura 3.12: Distribución de Temperatura en el modelo

También es posible, y muchas veces práctico, ver la distribución de temperaturas en escala discreta y en algunos casos ver las líneas isotérmicas como se muestran en la figura 3.13.

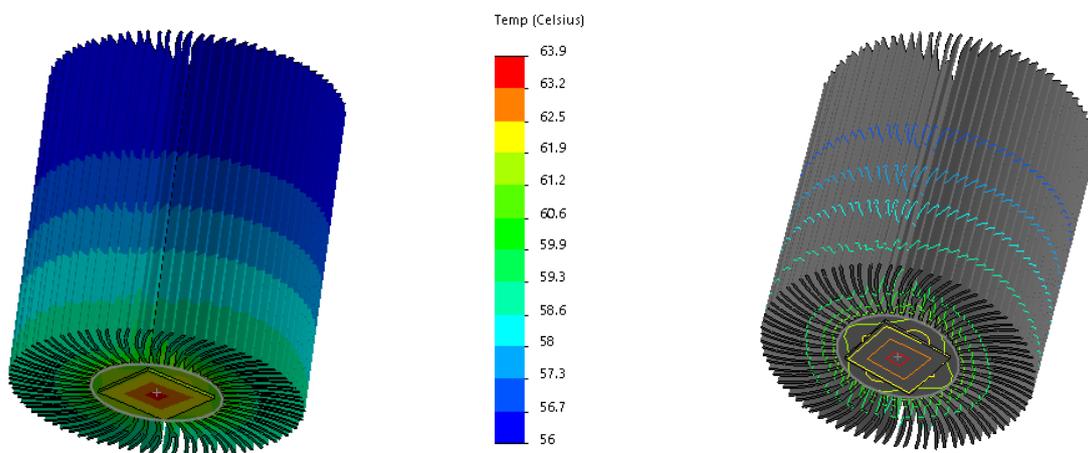


Figura 3.13: Temperaturas en escala discreta y por líneas isotérmicas.

Un corte transversal en nuestro modelo nos permite ver lo que sucede en su interior. En la figura 3.14 se muestra la distribución de temperatura en la sección transversal del disipador.

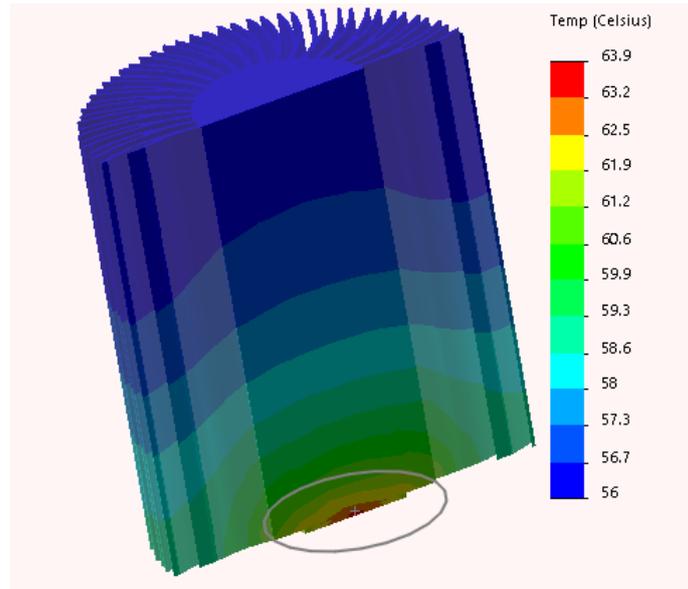


Figura 3.14: Corte transversal vertical del modelo mostrando la distribución de temperatura

Se observa que la máxima temperatura que se presenta en el modelo se encuentra en el chip LED y además que, en la región cercana al mismo, la distribución de temperatura tiene un comportamiento que podemos asumir esencialmente radial. Dentro de los resultados obtenidos, se puede adjuntar los gráficos correspondientes a las caras inferior y superior del disipador. En la figura 3.15 se muestran los resultados obtenidos para dichas secciones.

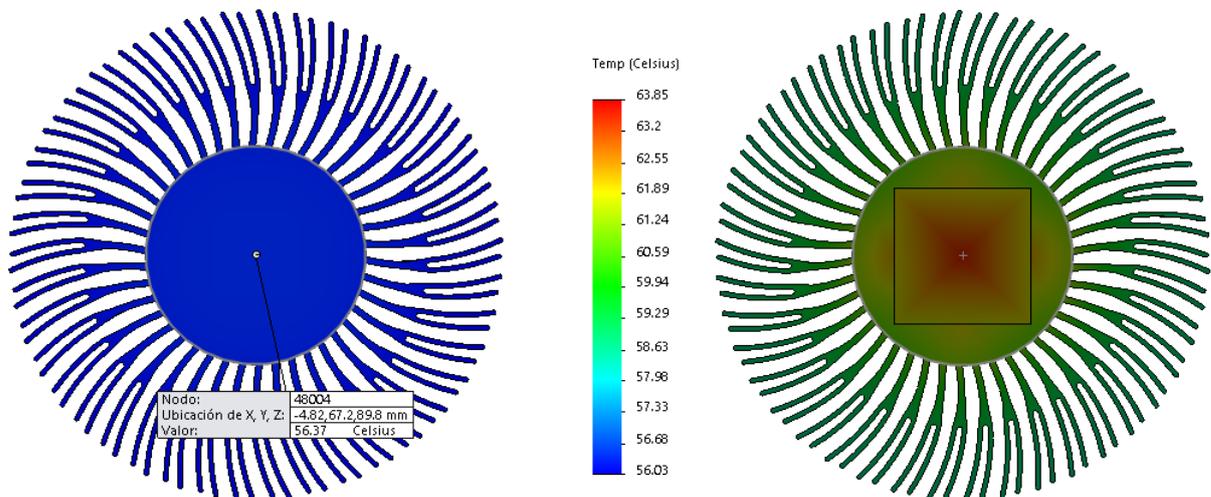


Figura 3.15: Temperaturas en la cara superior y en la base inferior del modelo.

Se puede observar que en la base inferior la mayor temperatura se encuentra en el centro del LED, como era de esperar ya que es la fuente de calor, mientras que en la cara superior la temperatura alcanzada es menor y prácticamente constante en toda la superficie. En esta cara se presenta la menor temperatura obtenida en la simulación.

3.4.2. Gradiente de Temperatura

El gradiente de temperatura proporciona información adicional como la dirección en que la temperatura aumenta. Es un vector que corresponde a la variación de la temperatura en el espacio. En la

figura 3.16 se observa el gradiente. Se puede ver que los vectores indican que la temperatura aumenta en dirección al chip LED, como era de esperar.

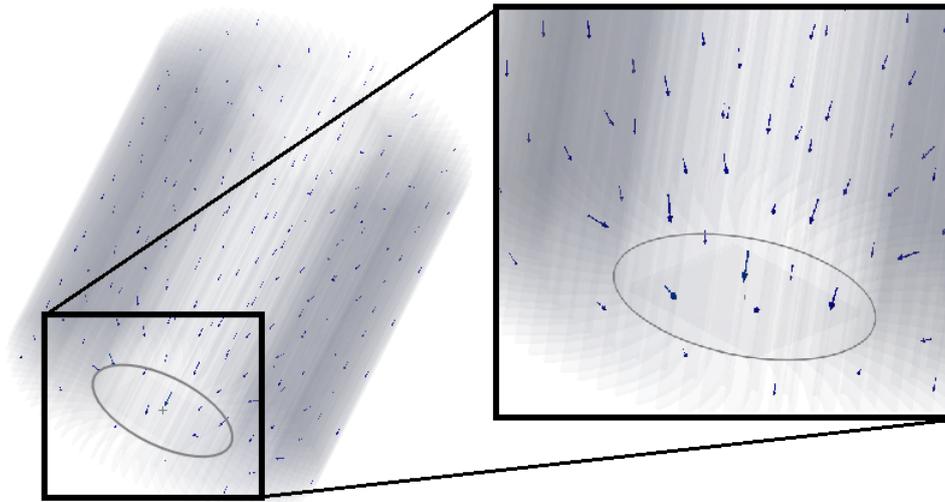


Figura 3.16: Gradiente térmico calculado en el modelo.

En la figura 3.17 se observa la distribución del gradiente con sus valores calculados por el programa.

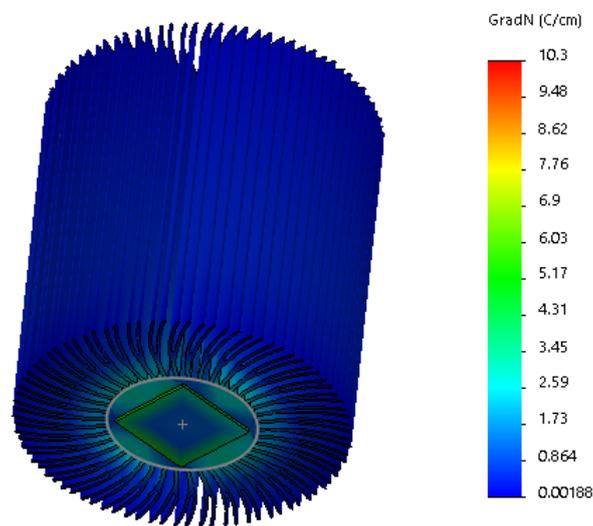


Figura 3.17: Gradiente térmico.

3.4.3. Flujo de Calor

Una diferencia de calor debe existir para que haya transferencia de calor. El calor siempre se transfiere en la dirección en que disminuye la temperatura [1]. El flujo de calor es un vector que se puede usar para observar la dirección en la que se transfiere el calor.

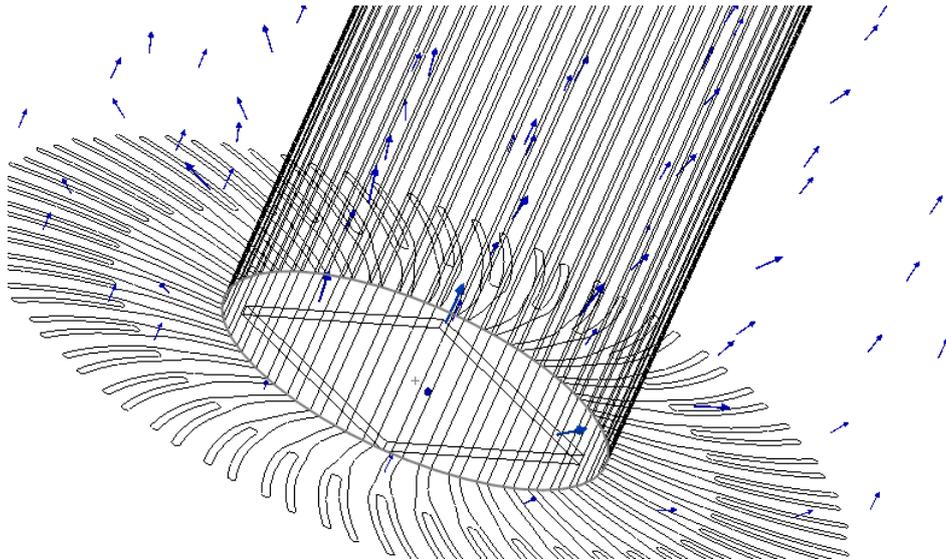


Figura 3.18: Flujo de Calor generado por la potencia calorífica del chip LED.

En este caso, en la figura 3.18 se puede ver que el vector de flujo de calor se aleja del chip, lo que concuerda con la realidad, pues el calor se transfiere del chip hacia el disipador y hacia las partes con menos temperatura del disipador.

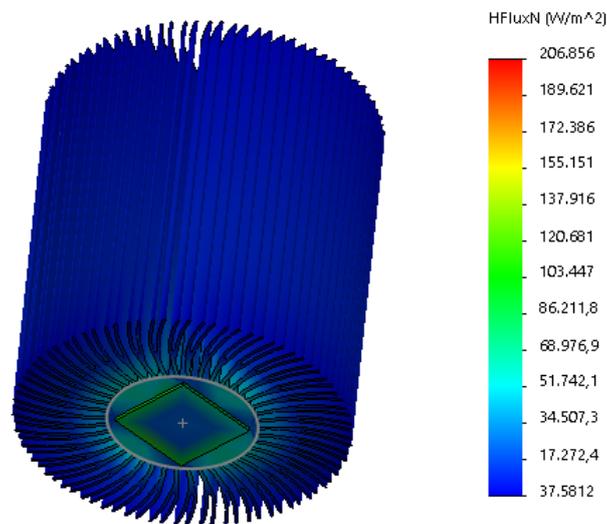


Figura 3.19: Flujo de Calor.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones correspondientes a cada programa se puede resaltar que son semejantes. En este capítulo se pretende comparar cada una de las simulaciones realizadas con mediciones reales obtenidas del análisis de un prototipo del disipador propuesto en laboratorio. Para esto se basará el estudio en los resultados obtenidos por [3]. En la figura 4.1 se muestra el prototipo utilizado.



Figura 4.1: Vista frontal y lateral de la bombilla prototipo [3].

La figura 4.2 muestra los resultados medidos en laboratorio donde el valor de a corresponde a la temperatura en el chip, b corresponde al centro de la parte superior del disipador y c es la temperatura del aire circundante. Se puede observar que, como sucedía en la simulación numérica, las temperaturas más elevadas se presentan en el chip LED y corresponden a la curva a . Adicionalmente, se puede comentar que las temperaturas en el punto b son menores que las medidas en a . Las temperaturas máximas alcanzadas para los puntos a y b son $63^{\circ}C$ y $49^{\circ}C$ respectivamente [3]. Dichas temperaturas fueron obtenidas al cabo de un tiempo necesario para la estabilización del sistema.

Uno de los puntos más importantes en este capítulo es resaltar que las simulaciones numéricas se acercan bastante a las mediciones de laboratorio sobre el dispositivo. Esto es un indicador de que las simulaciones son fiables, es decir, que el planteamiento del problema de comportamiento físico y todos los parámetros utilizados para el estudio fueron bien definidos. Las temperaturas máximas alcanzadas fueron $61,2^{\circ}C$ para la simulación de Comsol Multiphysics®, $63,9^{\circ}C$ para la simulación de Solidworks® y $63^{\circ}C$ para la medición experimental.

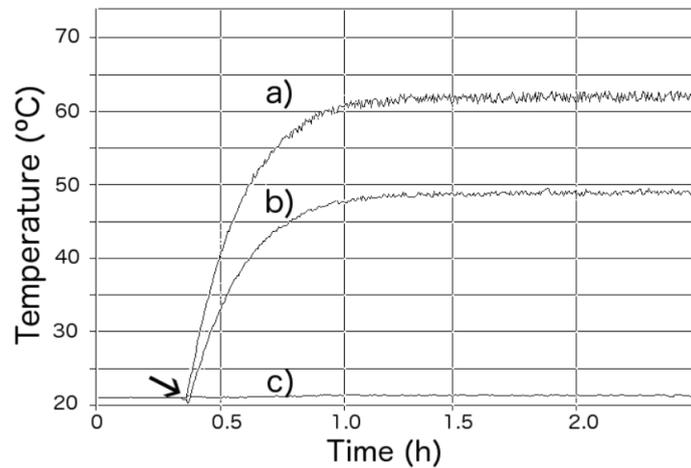


Figura 4.2: Resultados experimentales obtenidos en [3].

4.1. Cálculo del error entre resultados simulados y experimentales

En la presente sección, se hará un estudio del error mediante el cual se compararán los resultados obtenidos en las simulaciones y los resultados experimentales. La temperatura que se desea analizar (temperatura crítica), es la temperatura correspondiente al chip LED debido a que, como se mencionó anteriormente, el control de dicha temperatura garantiza el funcionamiento y vida útil del LED. La tabla 4.1 muestra un resumen de los resultados de la temperatura crítica obtenidos tanto de las simulaciones como del experimento expuestos anteriormente.

	Temperatura Máxima
Comsol Multiphysics®	61,2°C
Solidworks®	63,9°C
Experimento	63,0°C

Tabla 4.1: Valores de temperatura crítica.

Para cumplir con el objetivo planteado en esta sección, se calcularán los errores absoluto y relativo. Se compararán los resultados entre cada simulación con las mediciones reales. En la ecuación 4.1 se define el error absoluto (e) como el valor absoluto de la diferencia entre la temperatura de la simulación y la temperatura del experimento. Adicionalmente, en la ecuación 4.2 se define el error relativo (e_r) como la relación entre el error absoluto y el valor de la temperatura en el experimento.

$$e = |T_{sim} - T_{exp}| \quad (4.1)$$

$$e_r = \frac{e}{T_{exp}} \times 100\% \quad (4.2)$$

Una vez definidos los errores, se procede a realizar el cálculo de los errores correspondiente para la simulación de Comsol Multiphysics®.

$$\begin{aligned}
 e &= |T_{sim} - T_{exp}| \\
 &= |61,2 - 63| \\
 &= |-1,8| \\
 &= 1,8^{\circ}C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e_r &= \frac{e}{T_{exp}} \times 100 \% \\
 &= \frac{1,8}{63} \times 100 \% \\
 &= 2,86 \%
 \end{aligned}$$

Análogamente, se calculan los errores correspondientes a la simulación realizada en Solidworks®.

$$\begin{aligned}
 e &= |T_{sim} - T_{exp}| \\
 &= |63,9 - 63| \\
 &= |0,9| \\
 &= 0,9^{\circ}C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e_r &= \frac{e}{T_{exp}} \times 100 \% \\
 &= \frac{0,9}{63} \times 100 \% \\
 &= 1,43 \%
 \end{aligned}$$

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los valores de los errores calculados. Se observa que Solidworks® se acerca más al valor experimental ya que el error es menor que en el caso del Comsol Multiphysics®, sin embargo es importante resaltar que existen diferentes variables que pueden causar estos errores. Dentro de las principales variables que influyen directamente en el error, y que difieren en cada programa, son el tipo de malla y el tamaño de los elementos finitos que defina cada programa al momento de realizar la simulación.

Error	COMSOL ®	SOLIDWORKS ®
e	$1,8^{\circ}C$	$0,9^{\circ}C$
e_r	$2,86 \%$	$1,43 \%$

Tabla 4.2: Valores del error.

En general, a pesar de las variables que pueden influir en el valor de la aproximación numérica se observa que las soluciones obtenidas se aproximan bastante bien a la realidad. Se puede comentar que la simulación por Solidworks® muestra resultados más fiables debido a tener un error menor al compararlos con los valores medidos en un experimento real. Sin embargo, ambas simulaciones pueden ser aceptadas y ser tomadas como guías para el diseño y estudio de nuevos dispositivos.

4.2. Optimización utilizando Solidworks®

Hasta ahora el dispositivo utilizado para el estudio tiene las siguientes características: altura de 10cm , diámetro externo de 9cm , diámetro del cilindro macizo interno de 4cm y 42 aletas. El objetivo de esta sección es encontrar mejoras al dispositivo de forma numérica sin tener que construir físicamente y testear en laboratorio cada modificación que se le haga al diseño. Para esto la herramienta de Solidworks® llamada Estudio de Diseño permite analizar diferentes modelos del prototipo aplicando variaciones a determinadas características del diseño.

Para utilizar la herramienta de optimización del programa se debe seguir cierto procedimiento. En primer lugar, se definen los parámetros que serán las variables del estudio. Es decir, las características del diseño original que pueden variar dentro de la optimización. Luego, se determinan tanto el paso como los rangos dentro de los cuales pueden variar los parámetros. Posteriormente, se definen sensores que serán los encargados de controlar el proceso de optimización. Finalmente, se definen los objetivos y las restricciones del Estudio de Diseño, es decir, las mediciones de los sensores deben cumplir estrictamente las condiciones impuestas por los objetivos.

Al definir el paso y los rangos de variación de los parámetros estamos definiendo un determinado número de simulaciones dado por las combinaciones de todos los posibles escenarios. El Estudio de Diseño consiste en realizar las simulaciones de todas las combinaciones planteadas. Una vez obtenidos todos los resultados, el programa elige la combinación que mejor cumpla las condiciones establecidas por los objetivos.

4.2.1. Optimización del Disipador

Ahora, se aplicará el proceso detallado anteriormente al dispositivo estudiado. Debido a que la problemática del estudio se concentra en la temperatura máxima alcanzada por el chip LED, se define una restricción para la temperatura máxima del sistema que será de 80°C . Para el control de esta restricción se crea un sensor térmico. Dado que el interés es diseñar un disipador que sea altamente competitivo, se plantea el objetivo de minimizar la cantidad de material empleado en la fabricación. Para esto se implementa un sensor de masa cuya condición es minimizar la masa del disipador. En la figura 4.3 se muestra la interface del programa para la definición del Estudio de Diseño.

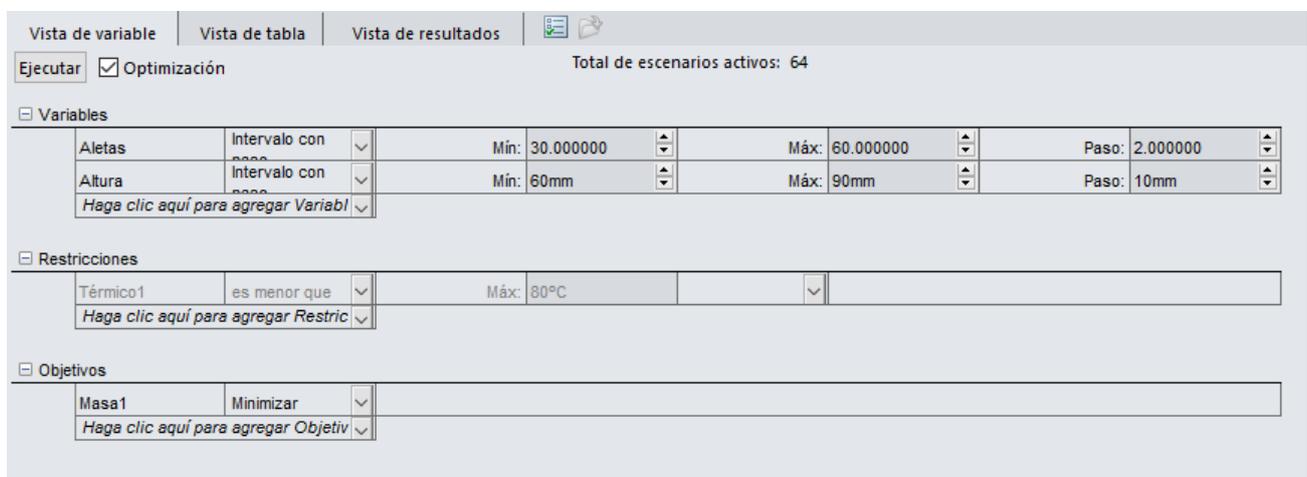


Figura 4.3: Pantalla de definición de Estudio de Diseño.

Los parámetros definidos para este estudio de optimización son la altura y el número de aletas. Los rangos para estos parámetros se han definido: para la altura de 6 a 9cm con paso de 1cm y el número de aletas de 30 a 60 con paso de 2 aletas. Dicha configuración también se puede observar en la figura 4.3. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos en el Estudio de Diseño.

		Actual	Inicial	Óptimo (22)	Escenario 18	Escenario 19	Escenario 20	Escenario 21	Escenario 22	Escenario 23
Aletas		40.000000	40.000000	40.000000	32.000000	34.000000	36.000000	38.000000	40.000000	42.000000
Altura		100mm	100mm	70mm	70mm	70mm	70mm	70mm	70mm	70mm
Térmico1	< 80°C	65.2945°C	65.2945°C	78.6411°C	87.3528°C	84.7888°C	82.4821°C	80.4329°C	78.6411°C	77.1067°C
Masa1	Minimizar	283.639 g	283.639 g	198.735 g	176.706 g	182.213 g	187.72 g	193.227 g	198.735 g	204.242 g

Figura 4.4: Resultados del Estudio de Diseño.

En la figura 4.4 se muestra algunos de los resultados del proceso de optimización. Como se puede observar, la herramienta diferencia los casos exitosos de los que no cumplen la restricción. En este caso los escenarios donde la temperatura máxima supera los 80°C se muestran en rojo. El programa escoge, de los escenarios exitosos, el que menos masa utiliza, y será definido como el escenario óptimo. Como resultado del proceso de optimización el escenario 22 ha sido seleccionado por el programa como el óptimo.

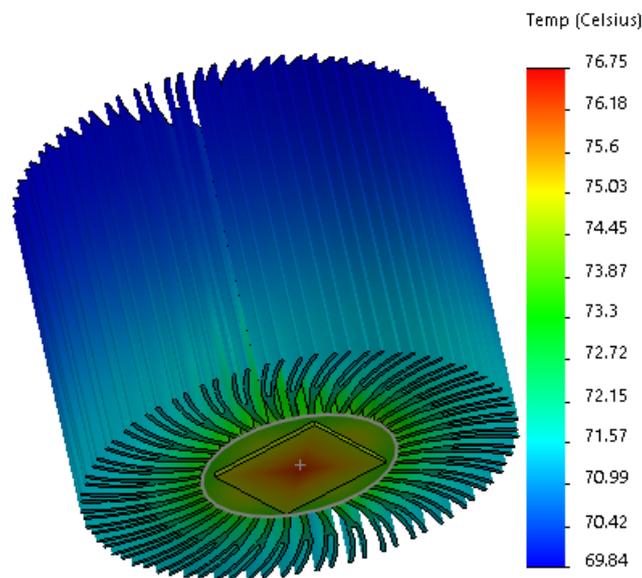


Figura 4.5: Temperatura del escenario óptimo.

En la figura 4.5 se muestra la distribución de temperatura del escenario óptimo donde se puede observar una temperatura máxima de 76,75°C y como se vio en la tabla de resultados la masa tiene un valor de 198,7g mientras que el dispositivo original tiene una masa de 291,5g. Es decir, se presenta una reducción en cantidad de material para la fabricación de un 32%. También el número de aletas original era de 42 mientras que el escenario óptimo tiene 40. Además la altura se redujo de 10cm a 7cm. Los parámetros aquí comparados se resumen en la tabla 4.3.

Parámetro	Original	Óptimo
Temperatura	63,9°C	76,75°C
Masa	291,5g	198,7g
Altura	10cm	7cm
Aletas	42	40

Tabla 4.3: Comparación Modelo Original vs. Modelo Óptimo.

Capítulo 5

Propuestas de nuevos diseños de disipadores de calor

En el presente capítulo se desea emplear más a fondo la herramienta de optimización por medio del Estudio de Diseño de dos disipadores comerciales con el objetivo de encontrar mejoras minimizando sus masas. Las simulaciones necesarias para esto tendrán como fuente calorífica el chip LED que se ha definido en el capítulo 3 el cual tiene una potencia de $50W$. De esta manera se verá la gran utilidad que representa esta herramienta y permite ver el alcance del desarrollo del Análisis de Elementos Finitos.

5.1. Propuesta 1

La primera geometría corresponde a la mostrada en la figura 5.1.

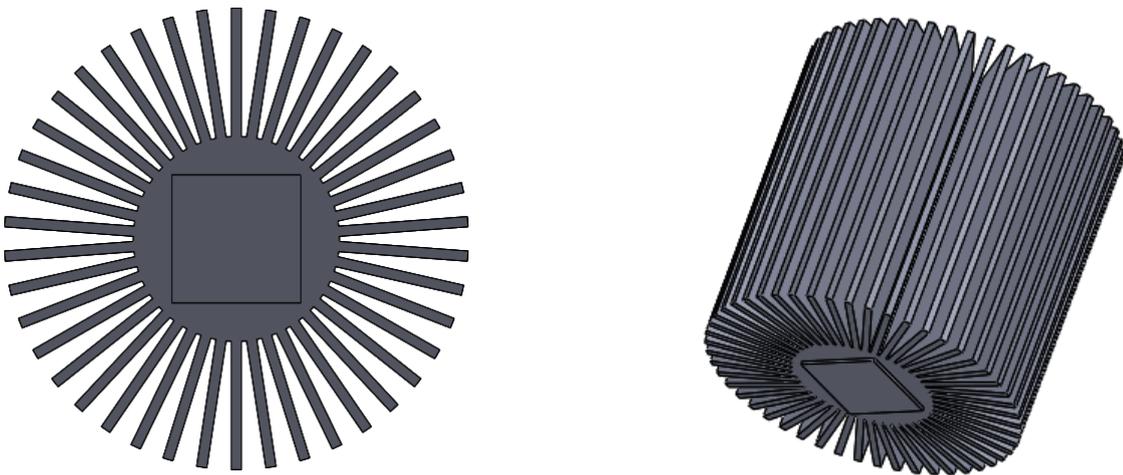


Figura 5.1: Vista planta inferior y general del disipador 1.

5.1.1. Detalles de la geometría

Este disipador tiene como características originales una altura de $10cm$, diámetro externo de $9cm$, diámetro del cilindro macizo interno de $4cm$, espesor de la aleta de $2mm$, número de Aletas 42. Nótese que las aletas son rectas y de sección constante .

5.1.2. Resultados de la simulación

En la figura 5.2 se puede ver la distribución de temperatura en el disipador y adicionalmente se ve una temperatura máxima de $77,92^{\circ}\text{C}$, lo que significa que este disipador se acerca al límite establecido por los requisitos del LED para garantizar su estabilidad y vida útil.

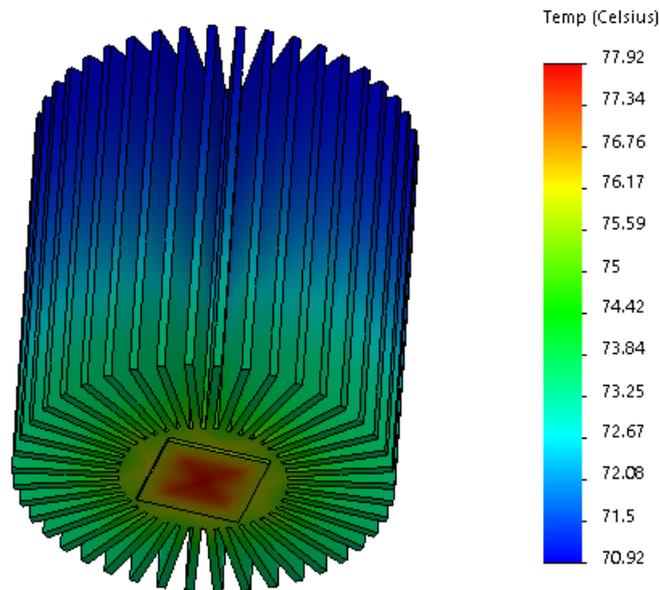


Figura 5.2: Resultados Estudio Térmico disipador 1.

5.1.3. Optimización del diseño

Para el proceso de optimización se sigue los mismos pasos que en el disipador ya analizado en el capítulo anterior. Primero se define una restricción en la temperatura de un valor máximo de 80°C . También se añade un sensor de masa con el objetivo de minimizar la masa del dispositivo. En este caso los parámetros a tener en cuenta dentro de la optimización son la altura y número de aletas. Al ejecutar el Estudio de Diseño se obtiene una optimización fallida ya que ninguno de los escenarios cumple con la restricción de temperatura de ser menor que 80°C para los rangos establecidos, los cuales se muestran en la figura 5.3.

Ejecutar Optimización Total de escenarios activos: 64

Variables

Altura	Intervalo con	Mín: 60mm	Máx: 90mm	Paso: 10mm
Aletas	Intervalo con	Mín: 30.000000	Máx: 60.000000	Paso: 2.000000

[Haga clic aquí para agregar Variabl](#)

Restricciones

Térmico2	es menor que	Máx: 80°C	Térmico 1
----------	--------------	-----------	-----------

[Haga clic aquí para agregar Restric](#)

Objetivos

Masa1	Minimizar
-------	-----------

[Haga clic aquí para agregar Objetiv](#)

Figura 5.3: Planteamiento del Estudio de Diseño del disipador 1.

5.2. Propuesta 2

La segunda geometría corresponde a la mostrada en la figura 5.4.

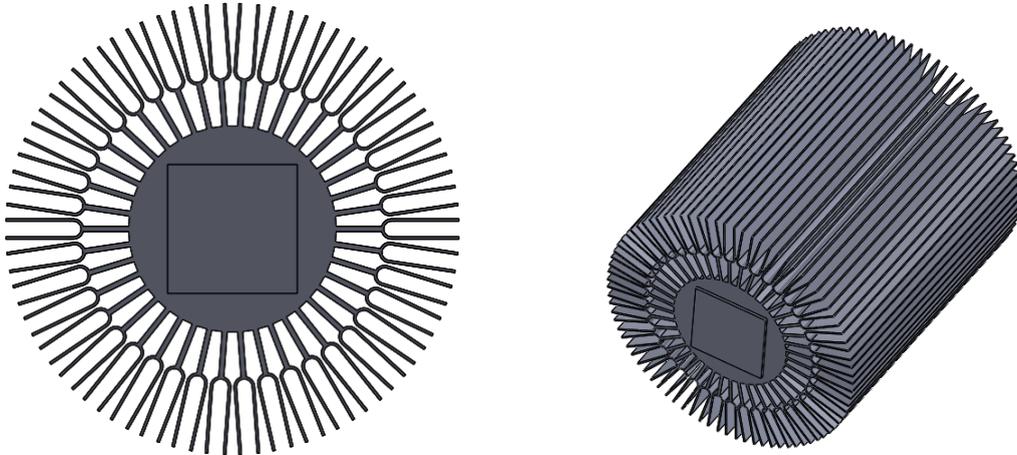


Figura 5.4: Vista planta inferior y general del disipador 2.

5.2.1. Detalles de la geometría

Este disipador tiene como características originales una altura de 10cm , diámetro externo de 9cm , diámetro del cilindro macizo interno de 4cm , número de aletas 42.

5.2.2. Resultados de la simulación

En la figura 5.5 se observa las temperaturas en el dispositivo. Se presenta una temperatura máxima de $75,65^{\circ}\text{C}$, y por tanto cumple con el límite establecido por los requisitos del LED para garantizar estabilidad y vida útil.

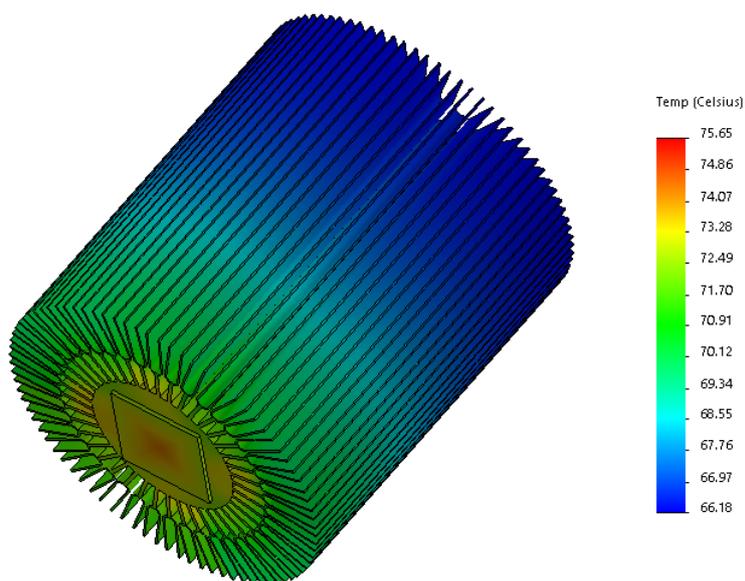


Figura 5.5: Resultados Estudio Térmico disipador 2.

5.2.3. Optimización del diseño

Se sigue los mismos pasos ya establecidos. Al ejecutar el Estudio de Diseño se obtiene que el escenario óptimo, para los rangos establecidos, tiene altura de 9cm y 30 aletas. Los rangos se muestran en la figura 5.6.

Variables						
Altura	Intervalo con		Mín: 60mm		Máx: 90mm	Paso: 10mm
Aletas	Intervalo con		Mín: 20.000000		Máx: 34.000000	Paso: 2.000000
Haga clic aquí para agregar Variabl						
Restricciones						
Térmico1	es menor que		Máx: 80°C		Térmico 1	
Haga clic aquí para agregar Restric						
Objetivos						
Masa1	Minimizar					
Haga clic aquí para agregar Objetiv						

Figura 5.6: Planteamiento del Estudio de Diseño del disipador 2

El escenario óptimo tiene una temperatura máxima en el chip LED de $79,17^{\circ}\text{C}$ y una masa de $179,76\text{g}$ y se muestra en la figura 5.7

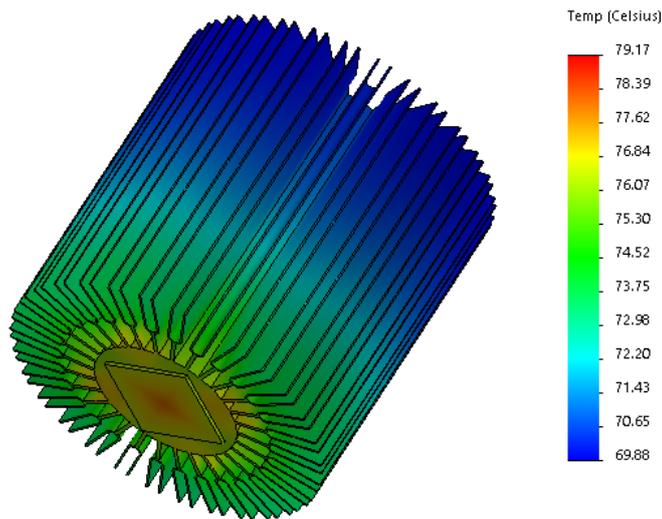


Figura 5.7: Escenario óptimo del disipador 2.

Los resultados de la optimización se resumen en tabla 5.1 donde se ve una reducción en la masa del 21,5 %.

Parámetro	Original	Óptimo
Temperatura	$75,65^{\circ}\text{C}$	$79,17^{\circ}\text{C}$
Masa	$229,02\text{g}$	$179,76\text{g}$
Altura	10cm	9cm
Aletas	42	30

Tabla 5.1: Comparación disipador 2 Original vs. disipador 2 Óptimo.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se simuló el problema de transferencia de calor de la oblea LED al disipador propuestos por [3] por medio del programa Solidworks®. El control de la temperatura en obleas LED es de crucial importancia para garantizar la estabilidad y durabilidad de las mismas. Se mostró que la temperatura alcanzada por el chip LED cumple con los requisitos de temperatura máxima permitida para luminarias LED de alta potencia y gracias a Solidworks® se ha mostrado este resultado con gran calidad de gráficos de distribución de temperatura, gradiente de calor y flujo de calor pudiendo observar que la temperatura alcanzada en cada región del disipador es proporcional a la distancia entre la región y el chip LED.

También se tomaron los resultados de [2] obtenidos por medio de Comsol Multiphysics® y se compararon con los resultados obtenidos con las simulaciones de Solidworks® para la bombilla propuesta por [3]. Se pudo observar que Solidworks® presenta un error menor al que presenta Comsol Multiphysics® en comparación con resultados obtenidos en mediciones reales de laboratorio por [3]. De este resultado se observó también que el error puede ser influido por diversas variables entre ellas las más influyentes son: el tipo de mallado y el tamaño de los elementos finitos los cuales, en general, son diferentes entre programas.

Además, se estudiaron cambios en el diseño del disipador, por medio de la herramienta de optimización del Solidworks®, para entender la relación que hay entre diversos parámetros y la eficiencia del disipador. Se pudo ver, también, que esta herramienta resulta ser práctica para escoger un diseño óptimo que logre los objetivos que se desea, permitiendo un ahorro de tiempo y dinero en fabricación de prototipos de prueba reales y extiende un poco más los beneficios que se obtiene de trabajar con métodos numéricos de aproximación de solución de ecuaciones en derivadas parciales como lo es el Método de Elementos Finitos.

Bibliografía

- [1] John Edward Akin, *Finite element analysis concepts: via solidworks*, World Scientific, 2010.
- [2] Diego Francisco Alarcón, *Iluminación pública basada en tecnología led*, Master's thesis, 2015.
- [3] Eduardo Balvís, Ricardo Bendaña, Humberto Michinel, Pedro Fernández de Córdoba, and Ángel Paredes, *Analysis of a passive heat sink for temperature stabilization of high-power led bulbs*, *Journal of Physics: Conference Series* **605** (2015), no. 1, 012005.
- [4] Daeseok Jang, Seung-Hwan Yu, and Kwan-Soo Lee, *Multidisciplinary optimization of a pin-fin radial heat sink for led lighting applications*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **55** (2012), no. 4, 515 – 521.
- [5] John W. Curran, <http://www.sitelighting.com>, 2015.
- [6] P. Mottier, *Led for lighting applications*, ISTE, Wiley, 2010.
- [7] N. Narendran and Y. Gu, *Life of led-based white light sources*, *Display Technology, Journal of* **1** (2005), no. 1, 167–171.
- [8] D.W. Pepper, *The intermediate finite element method: Fluid flow and heat transfer applications*, *Series in Computational Methods and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences*, Taylor & Francis, 1999.
- [9] Robert W Serth and Thomas Lestina, *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb*, Academic Press, 2014.
- [10] Younes Shabany, *Heat transfer: thermal management of electronics*, CRC Press, 2009.
- [11] Seung-Hwan Yu, Kwan-Soo Lee, and Se-Jin Yook, *Natural convection around a radial heat sink*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **53** (2010), no. 13–14, 2935 – 2938.

