



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA
DISIPACIÓN TÉRMICA PARA
LUMINARIAS LED DE USO PÚBLICO
ENTRE SIMULACIONES EN
SITUACIONES REALES Y DATOS
EXPERIMENTALES**

Alumno/a: Hervás Pulido, Manuel Jesús

Tutor: Prof. D. Manuel Jesús Hermoso Orzaez

Co-Tutor: Blas Ogáyar Fernández

Dpto.: Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Enero, 2019



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Don MANUEL JESÚS HERMOSO ORZAEZ, tutor y Don BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ, co-tutor del Trabajo Fin de Máster titulado: Análisis comparativo de la disipación térmica para luminarias LED de uso público entre simulaciones en situaciones reales y datos experimentales, que presenta MANUEL JESÚS HERVÁS PULIDO, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, ENERO de 2019

El alumno:

El tutor:

El co-tutor:

MANUEL JESÚS HERVÁS PULIDO

MANUEL JESÚS HERMOSO ORZAEZ

BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ

RESUMEN

Actualmente la tecnología LED se va imponiendo, día a día, en nuestras ciudades y hogares como forma de iluminación eficiente. Sus prestaciones lumínicas, durabilidad, eficiencia energética y lumínica, unida al ahorro económico que supone su utilización, están desplazando a otras formas clásicas de iluminación. No obstante comienzan a detectarse algunos problemas asociados a la durabilidad de los equipos relacionados a los problemas de disipación térmica y temperatura elevada, que acaban afectando su rendimiento lumínico y vida útil.

El objeto de este proyecto como Trabajo Fin de Máster es comparar los resultados obtenidos, a distintas temperaturas de contorno, mediante simulación térmica teórica de los modelos en 3D de luminarias LED de alumbrado público a través del software de simulación ANSYS Fluent. Contrastando estos resultados con los resultados prácticos reales obtenidos con una cámara termográfica FLUKE Ti 25.

La metodología que se desarrolla en el proyecto es la siguiente. En primer lugar se obtendrá información de las luminarias que se van a someter al estudio poniéndose en contacto con los fabricantes de las mismas. Posteriormente, se realizarán los modelos en 3D de las luminarias elegidas con el software de diseño CATIA. A continuación, se discretizarán los modelos 3D, previamente realizados, con el software de simulación de ingeniería Altair Hypermesh. Una vez que se tienen los modelos discretizados, se realizará la simulación de la disipación térmica teórica por el Método de los Volúmenes Finitos a través del software de simulación ANSYS Fluent. Cuando las simulaciones han convergido, se procede a la obtención de los resultados teóricos a través de Altair Hyperview, que es un entorno completo de post procesamiento y visualización para CFD (Computacional Fluid Dynamic).

Después de obtener los datos teóricos de la disipación térmica de los modelos 3D, se contrastarán los resultados teóricos con los resultados reales aplicados a las diferentes luminarias. Donde se estudiará la disipación térmica real,

obtenida para cada una de ellas, en el laboratorio de luminotecnia con la cámara termográfica FLUKE Ti 25. Se evaluarán los resultados teóricos y experimentales obtenidos y se discutirán los resultados comparando entre los diferentes modelos 3D y luminarias, terminando el estudio con una conclusión sobre la disipación térmica de las luminarias y como se ve afectada por el diseño y la elección de los materiales.

ABSTRACT

Currently, LED technology is being imposed, day by day, in our cities and homes as a form of efficient lighting. Its lighting performance, durability, energy efficiency and light, together with the economic savings that its use implies, are displacing other classic forms of lighting. However, some problems associated with the durability of the equipment associated with the problems of thermal dissipation and high temperature begins to be detected, which end up affecting their light output and useful life.

The purpose of this project as Master's Thesis is to compare the obtained results, at different contour temperatures, by theoretical thermal simulation of the 3D models of LED street lighting luminaires through the ANSYS Fluent simulation software. Contrasting these results with the actual practical results obtained with a FLUKE Ti 25 thermal imaging camera.

The methodology developed in the project is as follows. Firstly, information will be obtained on the luminaires that will be submitted to the study by contacting the manufacturers of the same. Afterwards, the 3D models of the chosen luminaires will be made with the CATIA design software. After that, the 3D models, previously realized, will be discretized with the Hypermesh engineering simulation software. Once the discretized models are available, the simulation of the theoretical thermal dissipation is carried out by the Finite Volume Method through the ANSYS Fluent simulation software. When the simulations have converged, the theoretical results

are obtained through Hyperview, which is a complete post processing and visualization environment for CFD (Computational Fluid Dynamic).

After obtaining the theoretical data of the thermal dissipation of the 3D models, the theoretical results will be compared with the actual results applied to the different luminaires. Where the real thermal dissipation is studied, it is obtained for each one of them, in the lighting laboratory with the FLUKE TI 25 thermographic camera. The theoretical and experimental results are evaluated and the results are discussed comparing the different 3D models and luminaires, finishing the study with a conclusion about the heat dissipation of the luminaires and how you have been affected by the design and choice of materials.

PALABRAS CLAVE

LED, disipación térmica, simulación térmica, luminaria, CFD Computacional-Fluid-Dynamics, MVF Método-Volúmenes-Finitos.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA TEÓRICA.....	12
2.1. Simulación CFD.....	13
2.1.1. Pre procesado	14
2.1.1.1. Seleccionar las luminarias que se van a estudiar	14
2.1.1.2. Obtener información de las luminarias que se van a analizar	13
2.1.1.3. Elaborar los modelos en 3D de los distintos equipos	16
2.1.1.4. Discretizar los modelos de 3D para su estudio	17
2.1.1.4.1. Discretización luminaria Modelo A.....	19
2.1.1.4.2. Discretización luminaria Modelo B	29
2.1.1.5. Configurar las características físicas y del solucionador	33
2.1.1.5.1. Definir las propiedades de los materiales	33
2.1.1.5.2. Definir los modelos físicos	33
2.1.1.5.2.1. Ecuaciones de conservación	33
2.1.1.5.2.1.1. Ecuación de conservación de la masa.....	34
2.1.1.5.2.1.2. Ecuación de cantidad de movimiento	35
2.1.1.5.2.1.3. Ecuación de energía	37
2.1.1.5.2.2. Método de los Volúmenes Finitos	41
2.1.1.5.3. Ajustar las condiciones de contorno	43
2.1.1.5.4. Determinar el solucionador del problema	43
2.1.1.5.5. Monitorear los residuales.....	48
2.1.2. Procesado	49
2.1.3. Post procesado	50
2.1.3.1. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo A a 20°C	51
2.1.3.2. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo A a 40°C	61

2.1.3.3. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo A a -10°C	71
2.1.3.4. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo B a 20°C.	80
2.1.3.5. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo B a 40°C.	87
2.1.3.6. Visualización de la temperatura y velocidad en el Modelo B a -10°C	96
2.1.3.7. Resumen de los datos térmicos teóricos de los Modelos A y B.....	102
3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA REAL EN EL LABORATORIO DE LUMINOTECNIA UTILIZANDO UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLUKE TI 25	105
3.1. Características de la cámara termográfica utilizada	105
3.2. Emisividad	107
3.3. Luminarias bajo estudio experimental	108
3.4. Datos adquiridos con la cámara termográfica	111
3.3.1. Datos termográficos Aire Serie 7	111
3.3.1. Datos termográficos NaviaP	115
3.3.1. Datos termográficos LH - GL1A.....	116
3.3.1. Datos termográficos T1A - 2 - 80	117
3.3.1. Datos termográficos Philips 20W	118
3.5. Evolución de la temperatura de las luminarias y temperaturas máximas de las mismas.....	119
4. RESULTADOS.....	122
4.1. Resultados Estudio Teórico ANSYS Fluent	122
4.1.1. Validación de los materiales	121
4.1.1.1. Comparativa Modelo A.....	122
4.1.1.2. Comparativa Modelo B.....	127
4.1.2. Análisis de los LED. Temperatura de unión (Tj)	133

4.2. Resultados Experimentales. Cámara Termográfica FLUKE TI 25.....	140
5. DISCUSIÓN.....	143
6. CONCLUSIÓN.....	149
7. AGRADECIMIENTOS.....	152
8. BIBLIOGRAFÍA.....	153

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el ahorro de energía en el alumbrado público está generando un gran interés y se ha convertido en una prioridad en la gestión de alumbrado municipal. Por lo tanto, las luminarias LED se están volviendo cada vez más frecuentes en nuestras ciudades [1]. La reciente tendencia a la sustitución a gran escala de luminarias que utilizan fuentes de luz de descarga con luminarias LED sin ningún ajuste significativo ha generado controversia [2].

El ahorro de energía de esta tecnología es evidente, justificado por su potencia reducida y el bajo consumo logrado con las luminarias LED en comparación con las lámparas de descarga tradicionales equivalentes lumínicamente [3]. La sustitución de las luminarias de descarga por luminarias LED puede realizarse cambiando la luminaria completa o, a modo de ahorro, acoplando en la luminaria existente de descarga los dispositivos electrónicos pertinentes para el uso (ver figura 2) [4]. La generación de calor en los LED no es irradiado como ocurre junto el haz de luz como ocurre con las lámparas de descarga, el calor producido es disipado por conducción a través de la parte trasera. Posiblemente no teniendo en cuenta la importancia de la disipación térmica y afectando negativamente a la vida útil de los dispositivos electrónicos y a las propiedades lumínicas de los LED [5].

La cromaticidad, las propiedades eléctricas y las térmicas de los dispositivos LED son altamente dependientes unos de otros [6], por lo tanto, la disipación de calor tiene un papel importante en la mejora de la eficiencia y confiabilidad de la iluminación LED [7].

Para un conjunto dado de condiciones de funcionamiento, la resistencia térmica interna y la temperatura de unión (T_j) son los parámetros críticos de los LED, que deben mantenerse a niveles nominales para su funcionamiento fiable y robusto [8]. Una mayor resistencia térmica interna provoca un aumento de

temperatura y una temperatura máxima más alta. Con las consecuencias negativas que esto acarrea.

La principal fuente de calor en un LED proviene de la unión entre el tipo p y el material semiconductor tipo n que compone el dispositivo. Este calor es un subproducto de la recombinación de electrones y agujeros en la unión o cerca. Idealmente, las recombinaciones resultan en fotones que salen del LED y contribuyen a la iluminación general, pero a menudo el fotón se reabsorbe en el molde, generando calor. Pequeñas vibraciones de la red cristalina del LED que ocurren mientras el dispositivo está funcionando también aumentan la temperatura [9]. Ver figura 1.

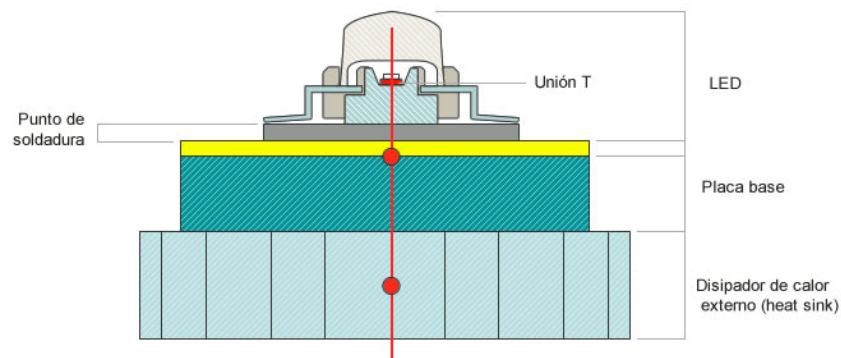


Figura 1. Generación de calor en un LED. Fuente: Keeping S. Understanding LED Internal Thermal Resistance. Contributed By Electronic Products, 2015.

Los LED convierten el 15% de la energía aplicada en luz y el 85% restante en calor. Los chips de alta potencia cada vez emiten más calor, lo que provoca una degradación del rendimiento [10] y, en última instancia, se traduce en una menor esperanza de vida de los productos LED. Por lo tanto, la industria está investigando las estructuras de diseño de productos para controlar el calor generado por los chips LED de alta potencia [11].

Debido a que la unión LED es pequeña, la densidad de energía es alta y la temperatura aumenta rápidamente, no es raro que la temperatura de unión (T_j) de los chips modernos aumente a 100 °C o más, y aunque los LED contemporáneos son mucho más robustos que los dispositivos más antiguos, mejorando el

funcionamiento prolongado a altas temperaturas de carácter indeseable [12]. Limitar la temperatura de unión reduce la variación de cromaticidad y prolonga la vida útil [5].

Para un conjunto dado de condiciones operativas un ingeniero puede calcular la temperatura de unión de un LED [13] y diseñar un sistema de disipación térmica para disminuir la temperatura de los dispositivos electrónicos y poder prolongar la vida de los LED [14].

Los chips modernos están diseñados con conductos de calor conductivo para canalizar el calor desde la unión al "punto de soldadura". El punto de soldadura es la parte del LED que entra en contacto con la PCB (Printed Circuit Board) y/o disipador de calor independiente [15].



Figura 2. Cambio de tecnología en la luminaria. A la izquierda luminaria con lámpara de descarga y a la derecha con tecnología LED. Fuente: ATP Iluminación Catálogo General 2015

Actualmente, la sustitución de las luminarias de descarga por luminarias LED puede realizarse cambiando la luminaria completa, por una nueva luminaria con características luminotécnicas y capacidad eficiente de disipación térmica. O bien, a modo de ahorro, adoptar una posición económica realizando sustituciones masivas de luminarias existentes (ver figura 2) [4], manteniendo la carcasa o envoltente de las mismas y sustituyendo la lámpara de descarga y el equipo de arranque o balastro electromagnético o electrónico, por equipos LED y driver [16]. Esto que a priori podría entenderse como una forma económica de proceder a renovar o modernizar las luminarias de las instalaciones. Está generando problemas hasta

ahora desconocidos, asociados a los sobrecalentamientos de los LED y de los equipos electrónicos de los Driver [3]. Calentamientos que sin duda acaban afectando a las condiciones de trabajo y la durabilidad de los equipos [5].

Por lo tanto, el objeto de este estudio es analizar la disipación térmica teórica de dos tipos de luminarias LED, realizando una batería de simulaciones de estas dos luminarias Modelo A y B, para varias temperaturas ambientales de funcionamiento [17]. La luminaria Modelo A corresponde con una luminaria LED de alta potencia con un diseño específico para conseguir unas prestaciones lumínicas adecuadas y una óptima disipación térmica. Y por otro lado la luminaria Modelo B corresponde con la luminaria original manteniendo la carcasa envolvente y donde se ha procedido a la sustitución del interior de la fuente de iluminación de descarga por una fuente con una placa LED y los respectivos drivers capaz de conseguir las mismas prestaciones luminotécnicas, pero manteniendo la envolvente original de la luminaria. Procediendo a analizar los resultados y observar la disipación de calor teórica que se produce en ellas utilizando el software ANSYS Fluent [18].

Posteriormente este trabajo se ha complementado con un análisis de resultados prácticos realizados con la Cámara Termográfica FLUKE Ti 25 [19], aplicada a 5 luminarias LED construidas con distintas tecnologías y con distintos materiales y diseño, con potencias distintas y altas prestaciones luminotécnicas de 5 fabricantes de primer nivel [10], analizando los resultados de disipación térmica de las cinco luminarias respetando las mismas condiciones de contorno en el laboratorio de luminotecnia [20]. Tratando de valorar y contrastar los resultados teóricos esperados a priori en la fase de diseño, con los resultados reales y prácticos obtenidos en la fase de producción, justificando desde un punto de vista térmico antes de proceder a realizar una sustitución masiva con los costes económicos asociados antes de desarrollar una gran inversión [16]. Pretendemos con este estudio tratar de observar como las condiciones del diseño y los materiales con los que están construidas las luminarias puede llegar a afectar de forma muy considerable a la capacidad de disipación térmica de los equipos, en base a las

temperaturas medidas en los distintos equipos o partes de la luminaria reduciendo los posibles problemas en los LED y en las partes que componen la luminaria. Trataremos de justificar como la mejora del diseño y la elección de los materiales son elementos clave que permiten una mejor disipación del calor en las luminarias en general y en los driver y LED, mejorando su estabilidad y su durabilidad [21].

2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA TEÓRICA

Para realizar el estudio teórico se ha determinado una metodología a seguir conforme el diagrama de flujos (figura 3) con el fin de obtener los resultados teóricos de la disipación térmica que se producirá en los dos Modelos A y B seleccionados [18] y poder así realizar la comparativa entre los datos obtenidos entre las simulaciones teóricas y los datos experimentales obtenidos con la cámara termográfica [22].

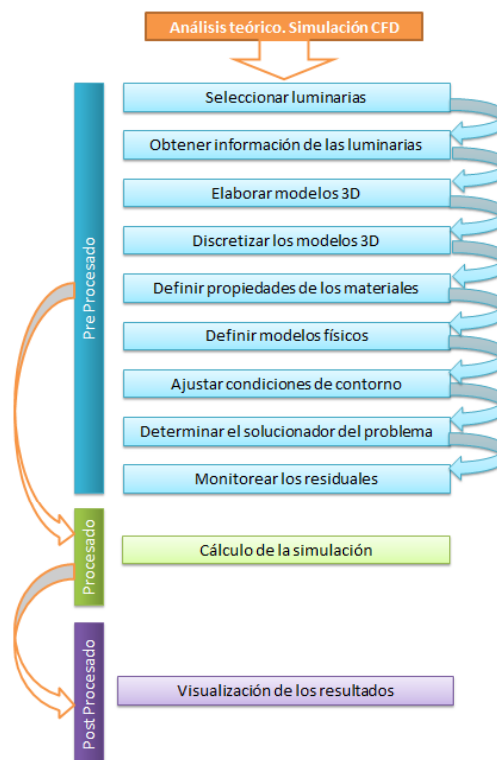


Figura 3. Diagrama de flujos para el análisis de la disipación térmica teórica.

Fuente: elaboración propia

2.1. Simulación CFD

La dinámica computacional de fluidos es la ciencia que predice el flujo de un fluido, la transferencia de calor y masa, reacciones químicas, y fenómenos relacionados mediante la resolución numérica del conjunto de ecuaciones matemáticas [23].

- Conservación de la masa
- Conservación de la cantidad de movimiento
- Conservación de la energía
- Conservación de especies
- Efectos de las fuerzas del cuerpo

El análisis de CFD complementa las pruebas y la experimentación al reducir el total esfuerzo y costo requerido para la experimentación y adquisición de datos [24].

En la simulación numérica hay 3 etapas: pre procesado, procesado y post procesado.

- Pre procesado: el problema que se va a estudiar es modelado para resolverlo. Los pasos que se incluyen en esta etapa son: generar el modelo, discretizar o mallar, selección de elementos, propiedades geométricas, selección de materiales, condiciones de contorno, tipo de análisis, etc.
- Procesado: es la fase de resolución del problema a través de las ecuaciones que se solventan de manera iterativa. Usando el software ANSYS Fluent, se ha desarrollado un método de simulación para investigar campos térmicos y de fluidos en una luminaria [25].
- Post procesado: evaluación de los resultados. Se utilizan distintos softwares para plotear los resultados obtenidos.

Para poder realizar la simulación con todas sus etapas se ha dispuesto de un equipo informático con los requerimientos necesarios para poder realizar los modelos en 3D, discretizarlos, resolver los problemas y validar los resultados.

2.1.1. Pre procesado

2.1.1.1. Seleccionar las luminarias que se van a estudiar

Se ha puesto en contacto con distintos fabricantes de luminarias LED para alumbrado público. La elección para realizar la simulación térmica se ha determinado por la facilidad de obtener los datos geométricos.

La empresa que ha facilitado los datos geométricos para la realización de la luminaria y los datos bajo la respectiva confidencialidad a este proyecto es ATP Lighting.

El estudio se va a realizar, por un lado seleccionando una luminaria de alta potencia y prestaciones lumínicas, fabricada con un novedoso diseño, especialmente orientado a la mejora de la disipación térmica que será referida con el nombre de Modelo A. Por otro lado utilizaremos una luminaria convencional de descarga donde se ha cambiado el interior (lámpara de descarga y balastro), acoplando la placa de diodos LED y los dispositivos electrónicos de control Driver, para obtener una luminaria LED adaptada, más económica y cuyo nombre a lo largo del estudio será Modelo B.

2.1.1.2. Obtener información de las luminarias que se van a analizar

Los fabricantes han proporcionado las distintas características y propiedades de las luminarias, quedando bajo confidencialidad en este proyecto. Algunos datos no son proporcionados y hay que elegir unos materiales genéricos porque cada material en concreto se trata una formulación o aleación especial que no nos pueden indicar. Se han obtenido los modelos en 2D de la luminaria Modelo A y

Modelo B, materiales correspondientes de los componentes que forman las luminarias, número de LED que la componen, potencias a las que trabajan, componentes electrónicos que se encuentra en la luminaria y potencia de funcionamiento.

El Modelo A consta de distintos componentes y materiales que se adjuntan en la tabla 1. Como se ha comentado anteriormente los materiales que se utilizan son genéricos porque cada material en concreto se trata de una formulación o aleación específica. La potencia nominal total de la luminaria es de 204W, de la cual 192W son para el funcionamiento de los LED y 12W para los drivers [26].

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Información</i>
<i>Cubierta</i>	PC	Opaco
<i>Disipador</i>	Aluminio	Confidencial
<i>Portaequipos</i>	PA66 – 30FV	
<i>Equipos</i>	PA66 – 30FV	
<i>Drivers</i>	Aluminio	2 drivers 6 W/driver
<i>Difusor</i>	PC	Transparente
<i>Chasis</i>	PA66 – 30FV	
<i>PCB</i>	Aluminio	
<i>LED</i>	Cobre / Material Rth	96 LED; 2 W/LED

Tabla 1. Componentes, materiales y potencias Modelo A. Fuente: ATP iluminación S.A.

Por otro lado, se va a estudiar un modelo, a partir de ahora, Modelo B, donde el interior (lámpara de descarga y equipo de encendido) de una luminaria convencional de descarga ha sido sustituido por una placa de diodos LED y por los dispositivos electrónicos (driver) necesarios, convirtiéndola en una luminaria LED manteniendo la carcasa o envoltente para ver la importancia de la disipación térmica y como afecta el diseño. El modelo con una potencia nominal total de 60W, que 53.4W son consumidos por los LED y 6.6W para el driver. Los materiales que se han utilizado para caracterizar los distintos componentes han sido los mismos

que la luminaria anterior para comparar mismos materiales con distintos diseños y distintas potencias [27]. Ver tabla 2.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Información</i>
<i>Cubierta</i>	PC	Opaco
<i>Disipador</i>	Aluminio	Confidencial
<i>Equipo</i>	PA66 – 30FV	
<i>Driver</i>	Aluminio	6.6 W/driver
<i>Difusor</i>	PC	Transparente
<i>Soporte</i>	PA66 – 30FV	
<i>PCB</i>	Aluminio	
<i>LED</i>	Cobre/ Material Rth	32 LED; 1.67 W/LED

Tabla 2. Componentes, materiales y potencias Modelo B. Fuente: elaboración propia.

2.1.1.3. Elaborar los modelos en 3D de los distintos equipos

La elaboración de los modelos se ha realizado en CATIA, (en inglés Computer – Aided Three Dimensional Interactive Application) [28], que consiste en un software de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador. Utilizando este software y haciendo uso de las herramientas que nos proporciona se consigue el modelo en 3D. Ver figura 4.

El modelo A, ha sido especialmente diseñado por el fabricante que permite la mejora de la disipación térmica, funcionamiento y durabilidad. Y por otro lado el modelo B, utiliza como base una luminaria de descarga, donde se ha implantado la tecnología LED manteniendo el diseño previo, sin modificar su envoltente, para estudiar la disipación térmica.

La elaboración de los distintos componentes se han diseñado intentando asemejarse lo mayor posible a la realidad. A la hora de realizar la simulación es mejor no tener formas complejas para el estudio y se aconseja trabajar con superficies limpias.

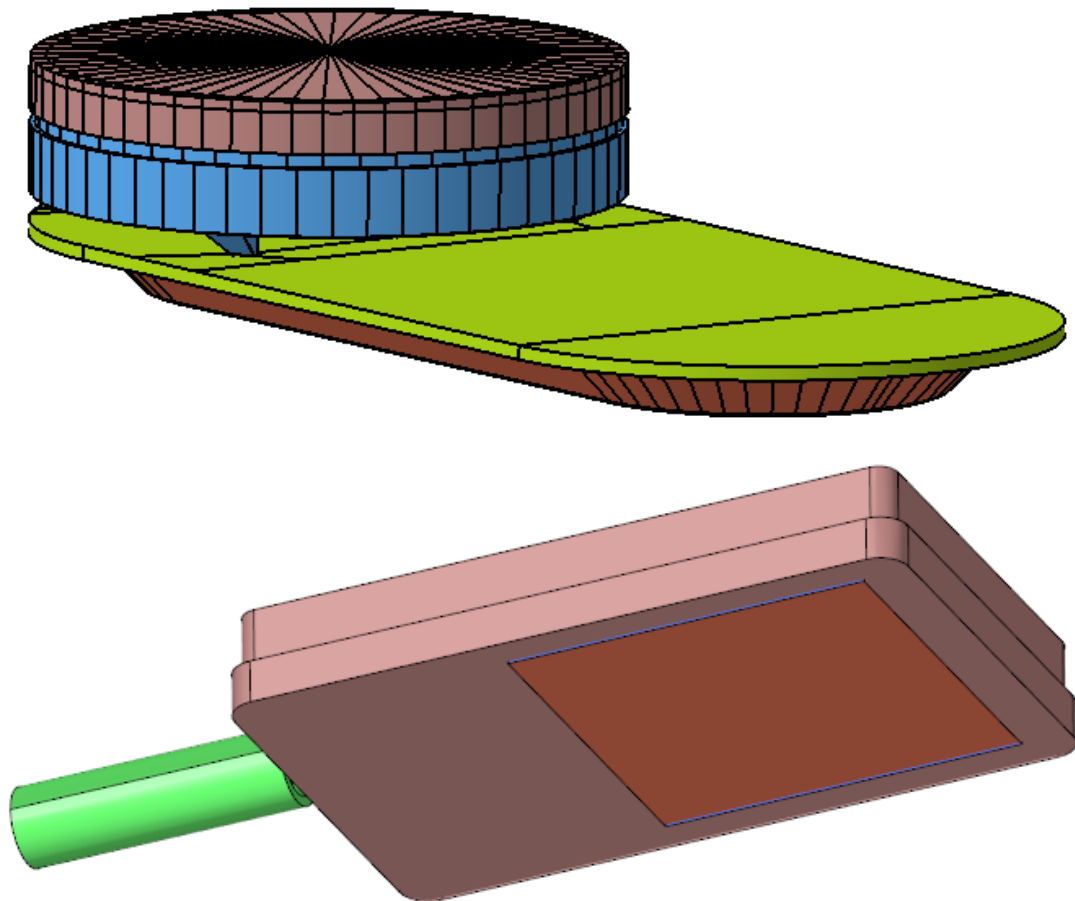


Figura 4. 3D de las luminarias Modelo A (arriba) y Modelo B (abajo). Fuente:
Elaboración propia a partir del software CATIA

2.1.1.4. Discretizar los modelos de 3D para su estudio

Para ejecutar la discretización se ha utilizado el programa específico Altair Hypermesh, es una plataforma de software de simulación de ingeniería asistida por ordenador (CAE, en inglés Computer Aided Engineering), en el cual se permite crear

modelos de elementos finitos para el análisis y preparar mallas de alta calidad de manera eficiente. Este programa ofrece herramientas de edición de geometría para preparar modelos CAD (Diseño Asistido por Ordenador, en inglés, Computer Aided Design) para el proceso de mallado. El método de discretización en el modelo 3D es en volúmenes finitos [29].

La exactitud y el tiempo de solución son preocupaciones fundamentales en las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), y ambas dependen en gran medida de las características de la malla. Se realiza una malla bidimensional con elementos triangulares (trías). Se tiene un control de la malla con Skew, esto significa un ángulo entre el vector desde cada nodo hasta el punto medio del lado opuesto y el vector entre los dos lados medios adyacentes en cada nodo del elemento es 90 grados menos el ángulo encontrado siendo este el Skew buscado [30]. En este estudio el Skew buscado es de 60 grados, proporcionando un triángulo lo más semejante posible a un triángulo equilátero para la posterior generación de los elementos 3D. Ver figura 5 - 6.

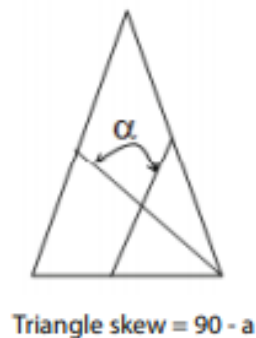


Figura 5. Definición de Skew. Fuente: Guía de control de mallado de Hypermesh

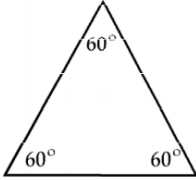
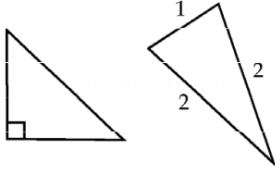
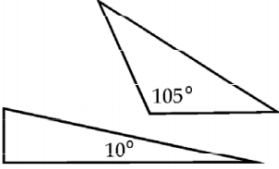
BEST	OK	VERY POOR
		

Figura 6. Control de mallado. Fuente: Guía de control de mallado de Hypermesh

Los elementos 3D son generados como tetraedros. Los componentes de las luminarias donde se requiere mayor detalle tienen un tamaño de malla menor que del resto de componentes. Los LED son los componentes de menor tamaño en el modelo debido a que tienen dimensiones muy pequeñas y son parte principal del estudio siendo la fuente emisora. Para que no haya problemas de estudio la transición entre elementos debe ser progresiva. Para los elementos 3D se hace un control de malla con Skew para que los elementos tengan una forma homogénea [30].

2.1.1.4.1. Discretización luminaria Modelo A

A continuación, en la serie de figuras de la 7 a la 25 representamos los componentes discretizados del Modelo A.

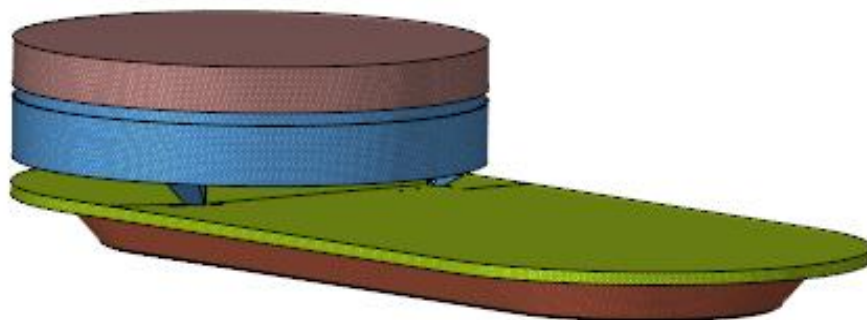


Figura 7. Luminaria discretizada. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

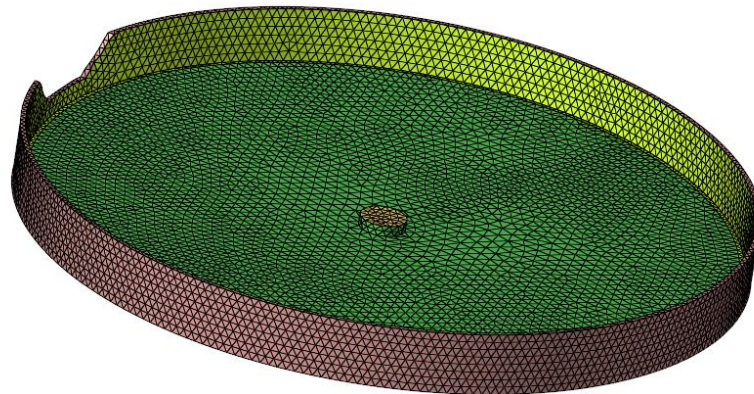


Figura 8. Cubierta. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

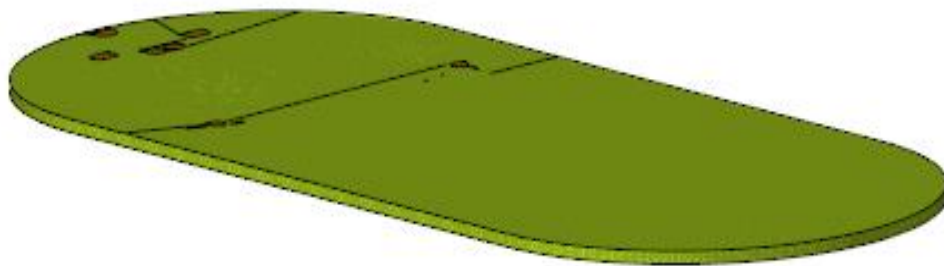


Figura 9. Disipador. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

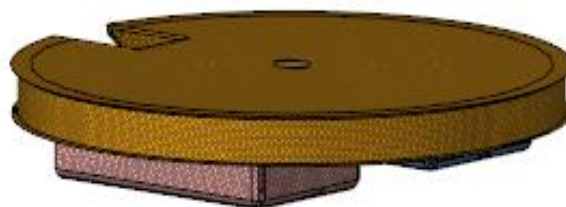


Figura 10. Portaequipos y equipos incluidos. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

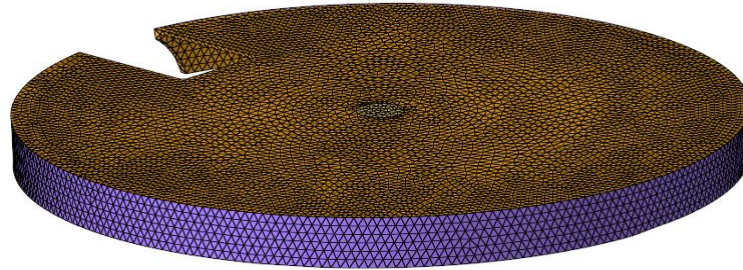


Figura 11. Portaequipos desde arriba. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH



Figura 12. Portaequipos desde abajo. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

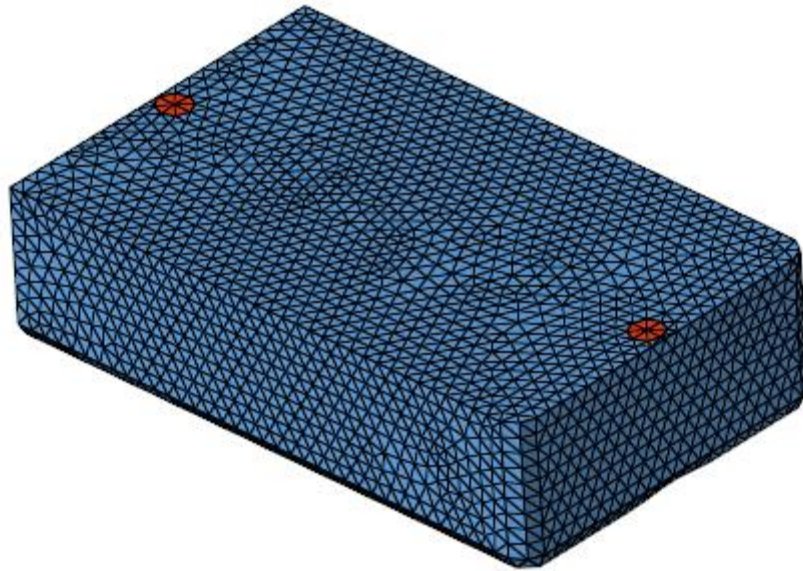


Figura 13. Equipo 1. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH



Figura 14. Driver en equipo 1. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

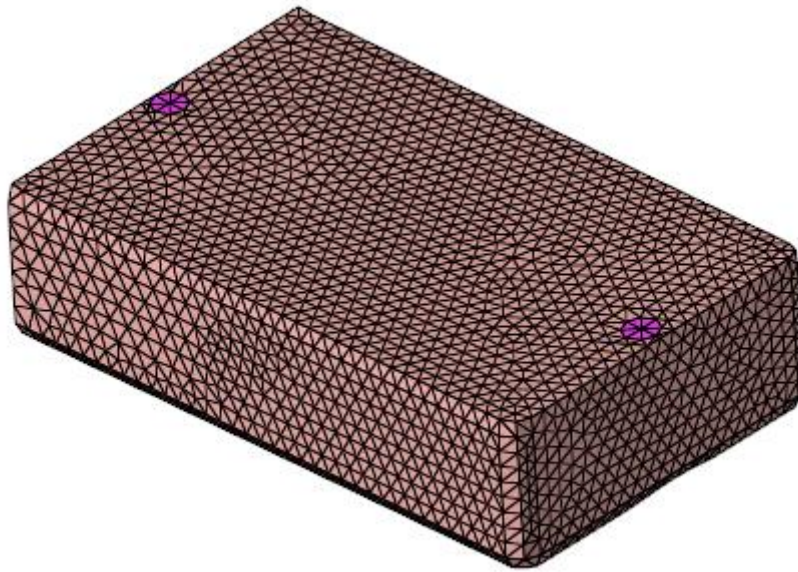


Figura 15. Equipo 2. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

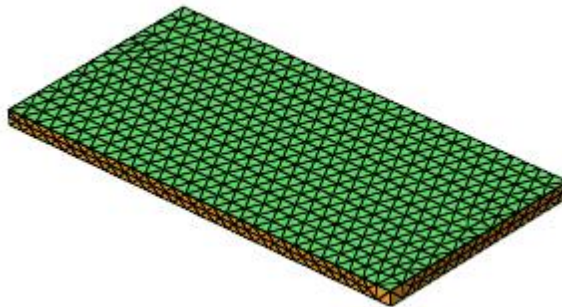


Figura 16. Driver en equipo 2. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

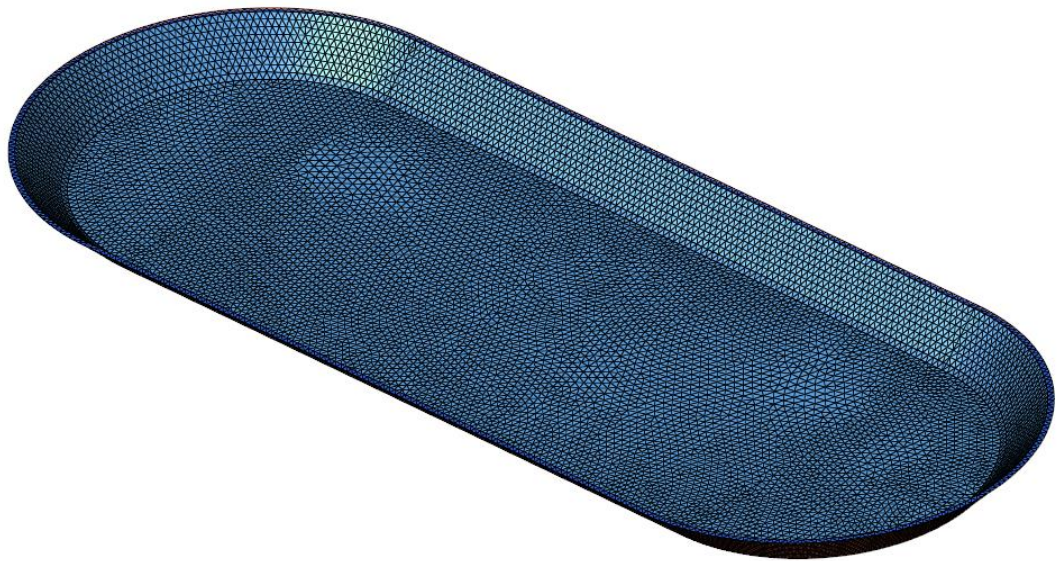


Figura 17. Difusor. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software
HYPERMESH

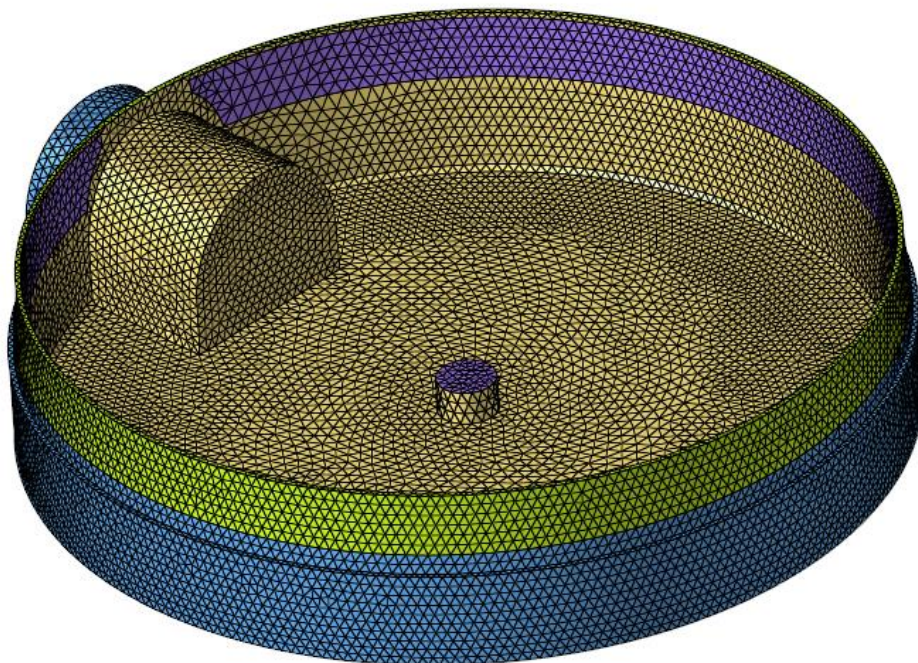


Figura 18. Chasis. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software
HYPERMESH

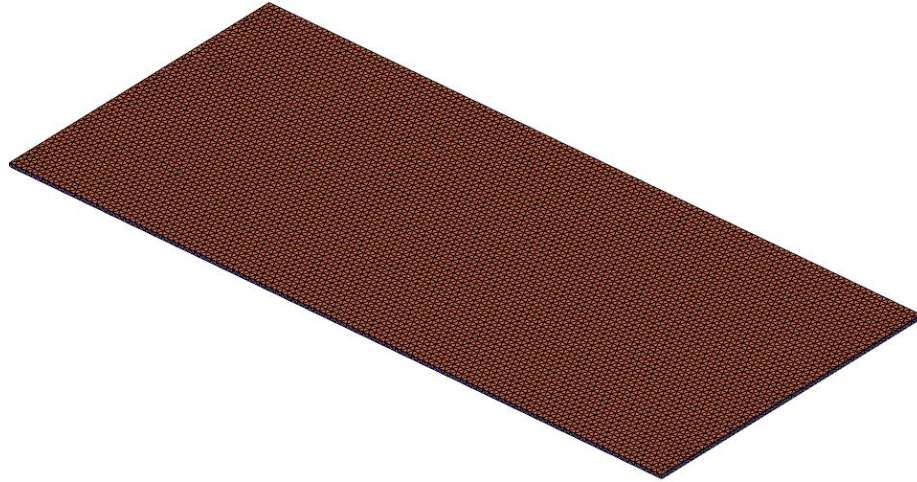


Figura 19. PCB. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

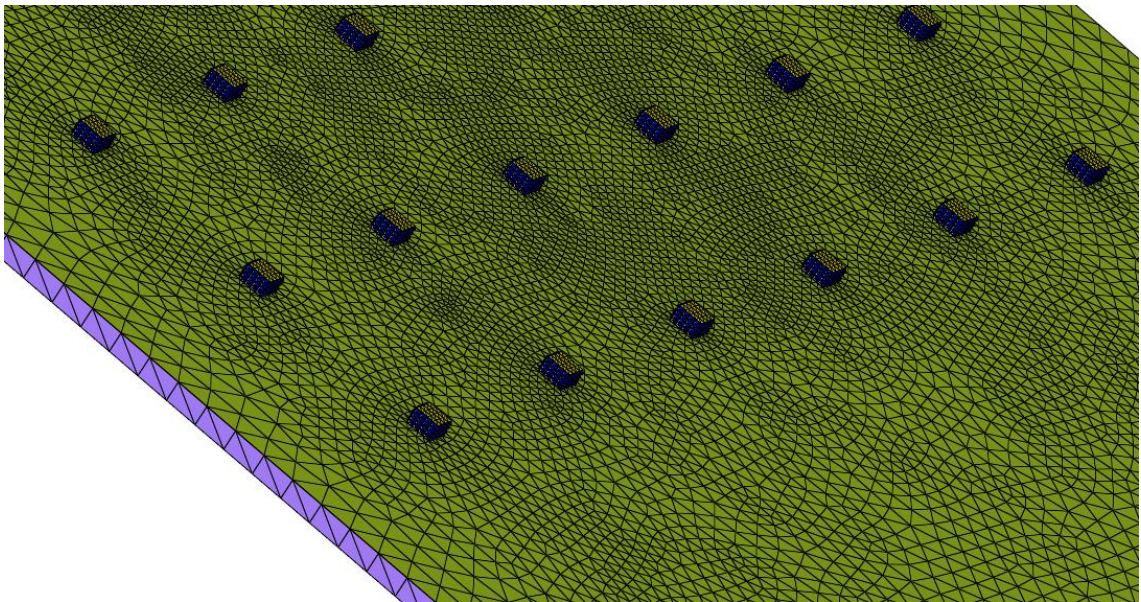


Figura 20. PCB y LED. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

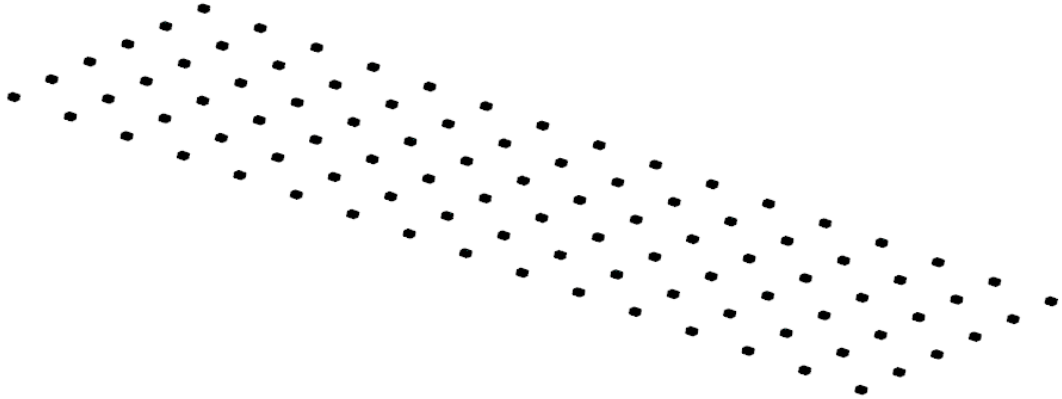


Figura 21. LED. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

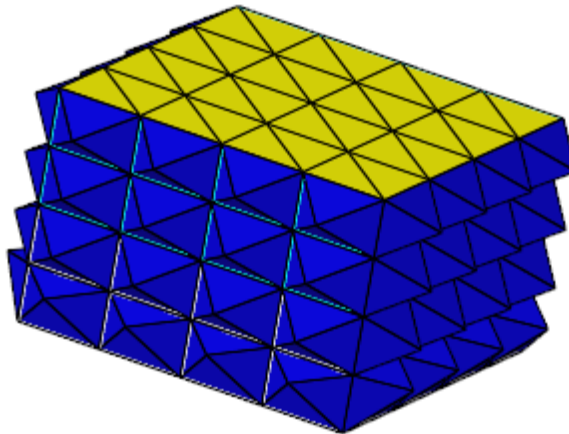


Figura 22. LED representativo para el estudio. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

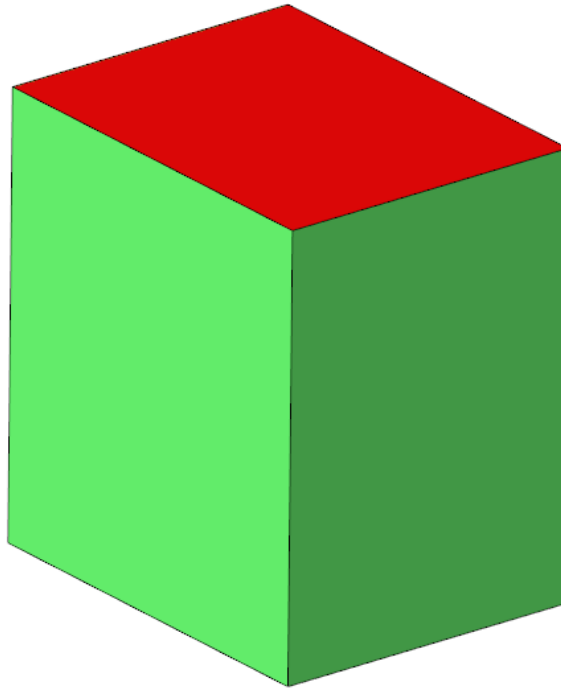


Figura 23. Caja envolvente a la luminaria. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

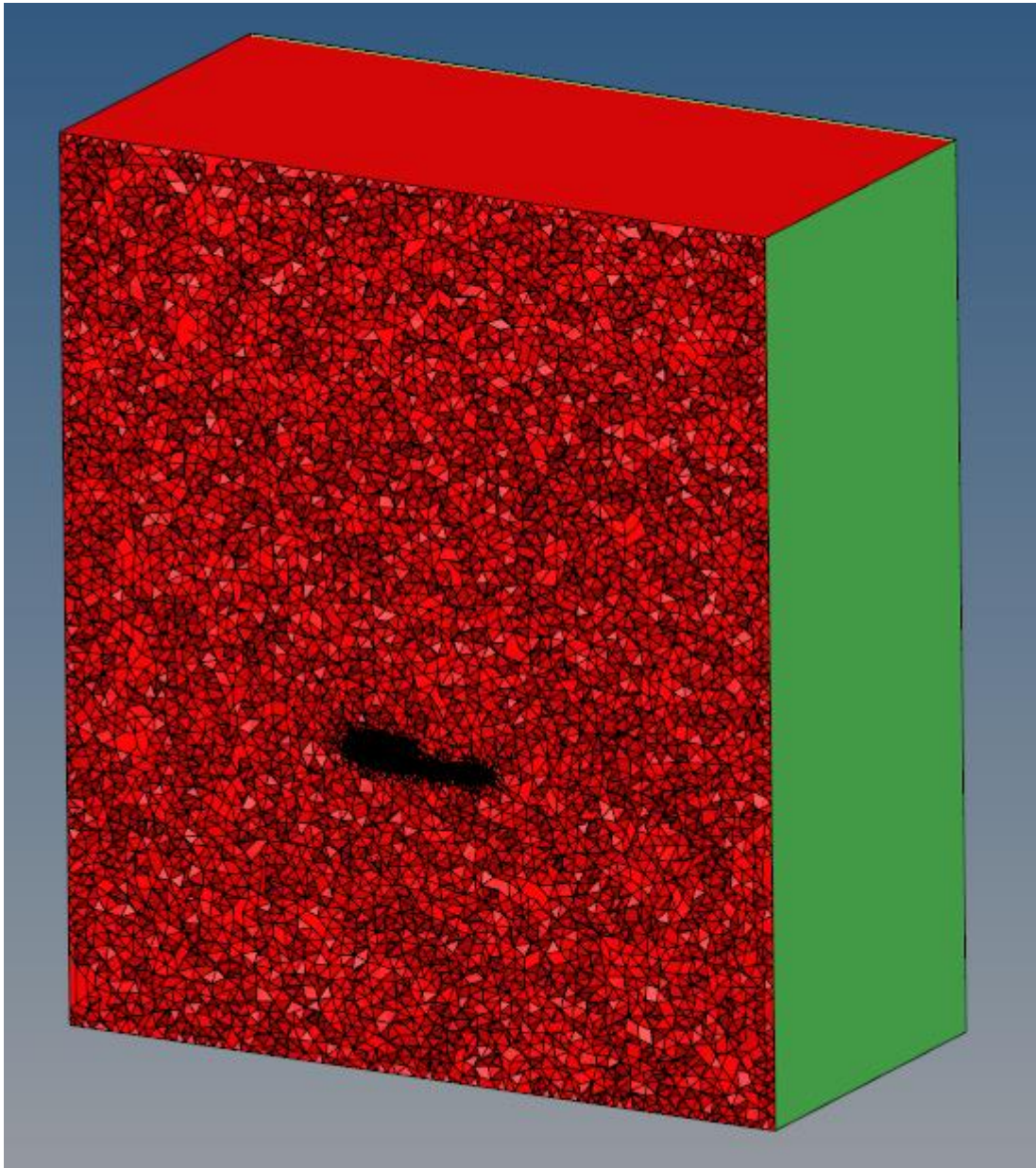


Figura 24. Sección media de los componentes y aire generados con tetraedros. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

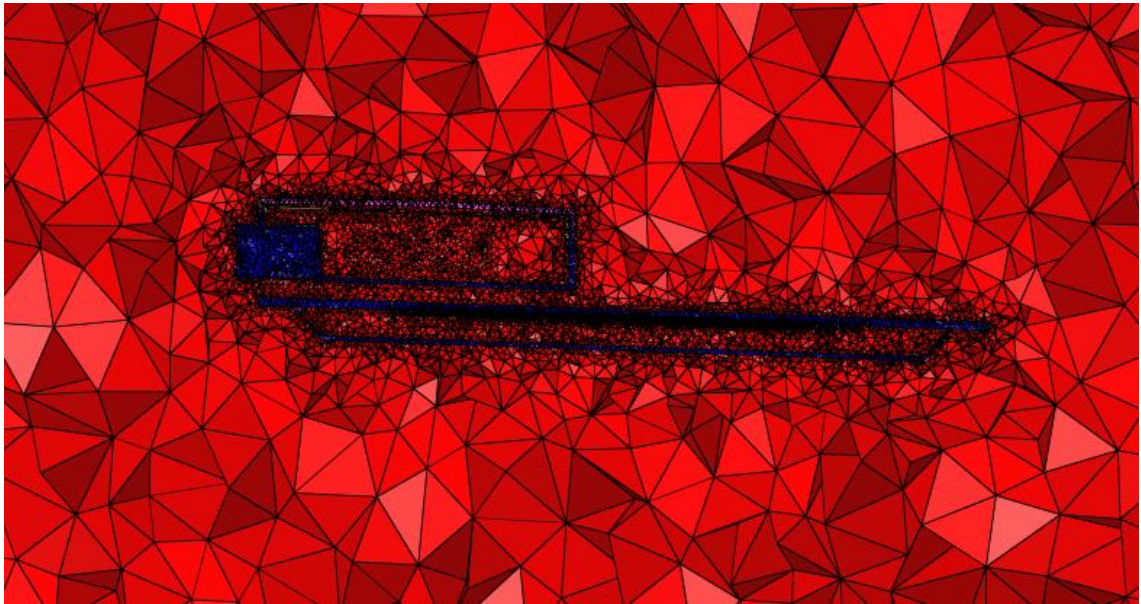


Figura 25. Sección media de los componentes y aire generados con tetraedros. Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

2.1.1.4.2. Discretización luminaria Modelo B

A continuación, en la serie de figuras 26 a 34 representamos los componentes discretizados del Modelo B.

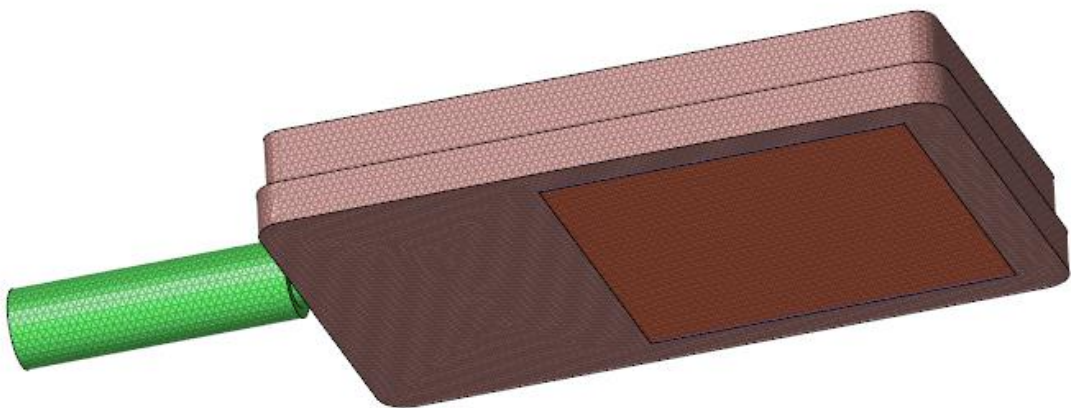


Figura 26. Luminaria discretizada. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

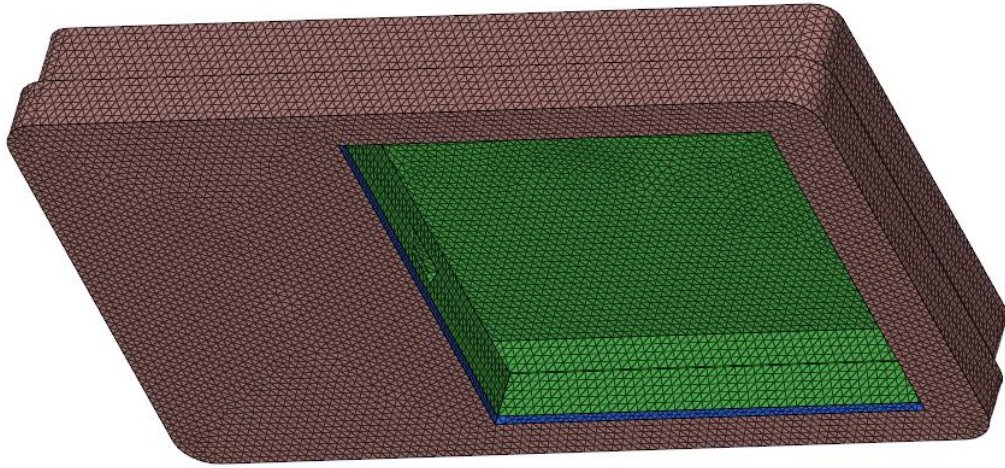


Figura 27. Cubierta. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

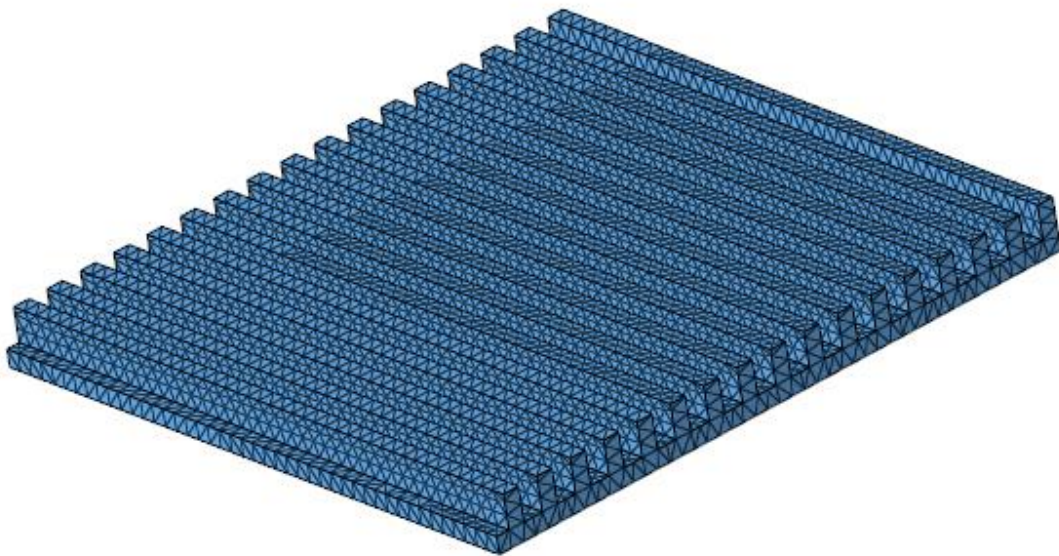


Figura 28. Disipador. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

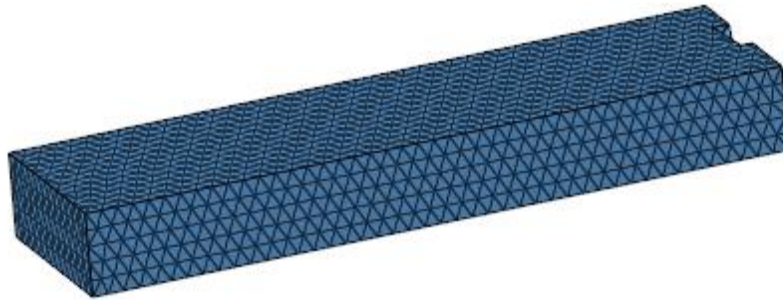


Figura 29. Equipo. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software
HYPERMESH



Figura 30. Driver. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software
HYPERMESH

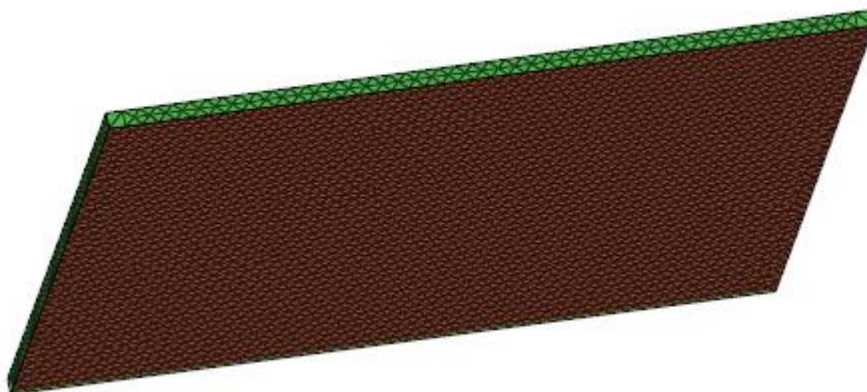


Figura 31. Difusor. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software
HYPERMESH

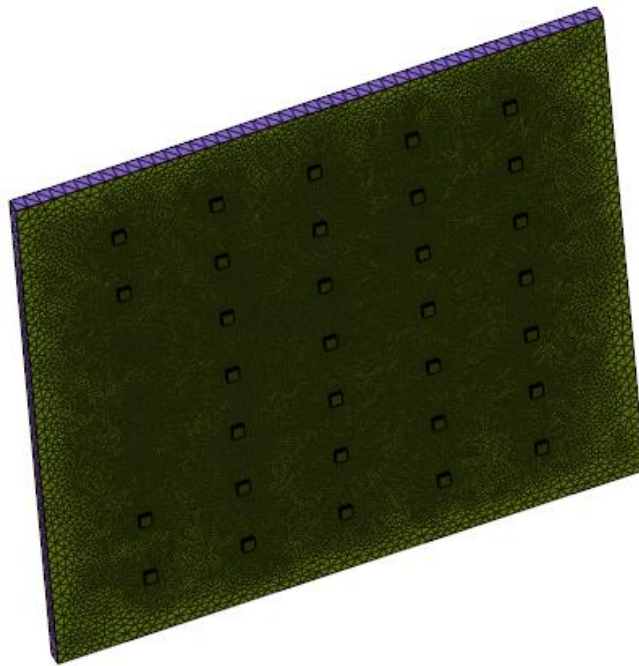


Figura 32. PCB y LED. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH



Figura 33. Sección media de los componentes y aire generados con tetraedros. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

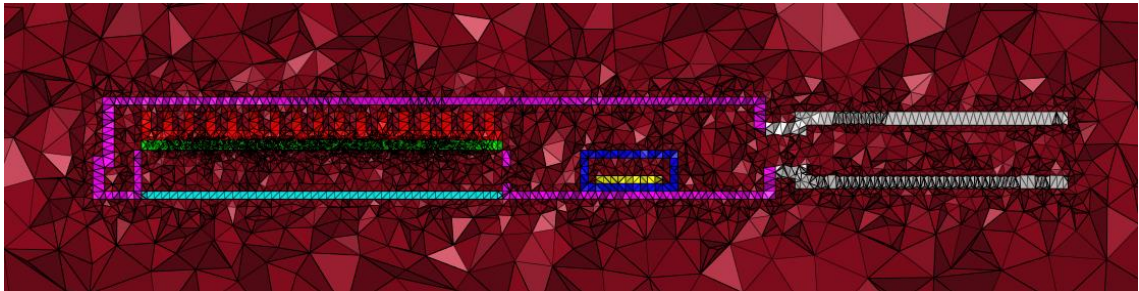


Figura 34. Sección media de los componentes y aire generados con tetraedros. Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

La malla ha sido generada en trías y tetraedros aunque en mallas cuadradas y hexaedros se pueden proporcionar soluciones de mayor calidad con menos células/nodos. Las mallas cuadradas y hexaedros muestran una difusión numérica reducida cuando la malla está alineada con el flujo, además se requiere mayor esfuerzo en generar una malla cuadrada y hexaedros [30].

2.1.1.5. Configurar las características físicas y del solucionador

2.1.1.5.1. Definir las propiedades de los materiales

Se definen las propiedades de los materiales que van a ser asignados a los distintos componentes de las luminarias para tenerse en cuenta durante el estudio y tener así mayor precisión en los resultados a la hora de ser comparados con los datos experimentales [31]. Las propiedades de los materiales que corresponden con los componentes de los Modelos A y B quedan reflejados en la tabla 3.

Material	Densidad kg/m ³	Calor específico J/kg·K	Conductividad térmica W/m·K
Aluminio	2750	961	200
PA66 – 30FV	1370	2290	0.29
PC	1200	1250	0.19
Cobre	8900	394	387
Material Rth Modelo A	3300	780	52.91
Material Rth Modelo B	3300	780	15.85

Tabla 3. Propiedades de los materiales de ambos modelos. Fuente: elaboración propia

La resistencia térmica del LED (Rth) de la luminaria del Modelo A es de 2.1 W/K [32] y el Modelo B de 3 W/K [33].

2.1.1.5.2. Definir los modelos físicos

2.1.1.5.2.1. Ecuaciones de conservación

El solucionador de ANSYS Fluent está basado en el método de volúmenes finitos [34]. El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control y las ecuaciones generales de conservación para masa, cantidad de movimiento, energía, etc, son resueltos en este conjunto de volúmenes de control.

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas en un sistema de ecuaciones algebraicas. Todas las ecuaciones son luego resueltas numéricamente para representar el campo de solución.

En un volumen fluido $V_f(t)$ que contenga un fluido de densidad $\rho = \rho(\vec{x}, t)$ que se mueva con una velocidad $\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, t)$ y con una energía $e = e(\vec{x}, t) + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{2}$, donde la posición, la forma y el tamaño del volumen fluido pueden ser variables con el tiempo, se aplicarán los principios de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía [35].

2.1.1.5.2.1.1. Ecuación de conservación de la masa

La conservación de la masa debe cumplirse en cualquier sistema cerrado. La masa ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. La ecuación que rige este principio es conocida como la ecuación de continuidad como recoge la ecuación 1 [35].

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \, dV = 0 \quad (1)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_f = volumen fluido

Aplicando el Teorema de Transporte de Reynolds se puede reescribir esta ecuación para un volumen de control como se expresa en la ecuación 2.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \, dV = \int_{V_c} \frac{d\rho}{dt} dV + \int_{S_c} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \quad (2)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_c = volumen de control
 S_c = superficie de control
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie

El primer término de la derecha de la ecuación 2 corresponde con la variación temporal de la masa en el volumen de control y el segundo término de la parte derecha corresponde con la cantidad de masa que abandona el volumen de control por la superficie de control.

$$\int_{V_c} \frac{d\rho}{dt} dV + \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \, dV = 0 \quad (3)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_c = volumen de control
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Donde ρ = densidad del medio
 $\vec{v}$ = velocidad

El primer término determina la variación respecto al tiempo de la masa por unidad de volumen y el segundo término corresponde con el flujo convectivo a través de la superficie límite de dicho volumen de control.

2.1.1.5.2.1.2. Ecuación de cantidad de movimiento

De acuerdo con la segunda ley de Newton, la variación temporal de la cantidad de movimiento de un sistema cerrado es igual a la resultante de las fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema. Ver figura 35. El principio de conservación de la cantidad de movimiento en un volumen fluido toma la forma [35]

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \vec{v} dV = \int_{V_f} \vec{f}_v dV + \int_{S_f} \vec{f}_n dS \quad (5)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_f = volumen fluido
 S_f = superficie fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{f}_v$ = fuerza por unidad de volumen sobre una partícula fluida de volumen dV
 $\vec{f}_n$ = fuerza por unidad de superficie sobre un elemento de superficie de área dS y orientación $\vec{n}$

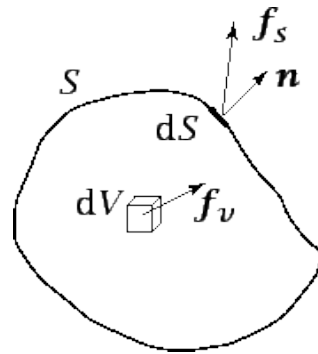


Figura 35. Fuerzas de volumen y de superficie que actúan sobre un volumen fluido. Fuente: Vera Coello M, Iglesias Estradé I, Sánchez Pérez A. L, Martínez Bazán C. *Ingeniería fluidomecánica*. Paraninfo. Madrid. 2012.

Cuando el fluido está en movimiento, además de las fuerzas de presión, aparecen fuerzas de superficie adicionales que se dominan fuerzas de viscosidad, que se expresan con la ayuda de un tensor de esfuerzos viscosos, $\bar{\tau}$, obteniendo

$$\int_{V_f} \frac{d}{dt} (\rho \vec{v}) dV + \int_{S_f} \rho \vec{v} \vec{v} \cdot \vec{n} dS - \int_{S_f} \vec{n} \cdot \bar{\tau} dS = \int_{V_f} \vec{f}_v dV \quad (6)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_f = volumen fluido
 S_f = superficie fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie
 $\bar{\tau}$ = tensor de esfuerzos viscosos
 $\vec{f}_v$ = fuerza por unidad de volumen sobre una partícula fluida de volumen dV
 $\vec{f}_n$ = fuerza por unidad de superficie sobre un elemento de superficie de área dS y orientación $\vec{n}$

En este caso el flujo es incompresible, se puede escribir de forma alternativa cuando la densidad es constante y, tal como ocurre en el caso de la gravedad, la fuerza es conservativa, $\vec{f}_v = \vec{g} = -\nabla(gz)$, por lo que

$$\int_{V_f} \frac{d}{dt} (\rho \vec{v}) dV + \int_{S_f} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS - \int_{S_f} \vec{n} \cdot \vec{\tau} dS = - \int_{V_f} (p + \rho g z) \vec{n} dS \quad (7)$$

Donde ρ = densidad del medio
 V_f = volumen fluido
 S_f = superficie fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie
 $\vec{\tau}$ = tensor de esfuerzos viscosos
 $\vec{f}_v$ = fuerza por unidad de volumen sobre una partícula fluida de volumen dV
 $\vec{f}_n$ = fuerza por unidad de superficie sobre un elemento de superficie de área dS y orientación $\vec{n}$
 g = gravedad

2.1.1.5.2.1.3. Ecuación de la energía

La variación con el tiempo de la cantidad de energía contenida en un volumen fluido es igual al trabajo que ejercen las fuerzas exteriores sobre el fluido por unidad de tiempo más el calor que se aporta por unidad de tiempo, $\dot{W}$, al fluido desde el exterior, $\dot{Q}$, [35] es decir

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) dV = \dot{W}_v + \dot{W}_n + \dot{Q} \quad (8)$$

Donde ρ = densidad del medio
 $e + \frac{1}{2} v^2$ = energía por volumen unitario
 V_f = volumen fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie
 $\dot{W}_v$ = trabajo de las fuerzas de volumen por unidad de tiempo
 $\dot{W}_n$ = trabajo de las fuerzas de superficie por unidad de tiempo
 $\dot{Q}$ = calor aportado al sistema por unidad de tiempo

Donde las fuerzas de volumen como las de superficie pueden realizar trabajo sobre el fluido, de forma que $\dot{W} = \dot{W}_v + \dot{W}_n$.

El trabajo de las fuerzas de volumen $\dot{W}_v$ sobre el conjunto de todas las partículas fluidas que componen el volumen de control se obtiene de sumar las distintas contribuciones individuales.

$$\dot{W}_v = \int_{V_f} \vec{f}_v \cdot \vec{v} dV \quad (9)$$

Donde V_f = volumen fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{f}_v$ = fuerza por unidad de volumen sobre una partícula fluida de volumen dV

Para el cálculo del trabajo de las fuerzas de superficie, se considera un elemento de superficie fluida dS y orientación $\vec{n}$ que se encuentran en la superficie del volumen fluido S_f . El trabajo por unidad de tiempo que se realiza sobre dicho elemento de superficie se obtiene de multiplicar el desplazamiento por unidad de tiempo $\vec{v}$ por la fuerza $\vec{f}_n dS$ donde $\vec{f}_n = -p\vec{n} + \vec{\tau} \cdot \vec{n}$. Al integrar a toda la superficie para tener en cuenta la contribución de todos los elementos que componen S_f se obtiene

$$\dot{W}_n = \int_{S_f} p \vec{v} \cdot \vec{n} dS + \int_{S_f} \vec{v} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS \quad (10)$$

Donde p = presión
 S_f = superficie fluido
 $\vec{v}$ = velocidad
 $\vec{n}$ = vector normal a la superficie
 $\vec{\tau}$ = tensor de esfuerzos viscosos

Donde se ha escrito separadamente las contribuciones del trabajo de las fuerzas de presión y de las fuerzas viscosas.

El calor se aporta al fluido por conducción a través de la superficie fluida S_f , pero también por radiación (R) o por reacción química (Q) en el interior del volumen fluido,

$$\dot{Q}_R + \dot{Q}_Q = \int_{V_f} (\dot{q}_R + \dot{q}_Q) dV \quad (11)$$

Donde $\dot{q}_R$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la radiación

$\dot{q}_Q$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la reacción química

V_f = volumen fluido

Donde $\dot{q}_R$ y $\dot{q}_Q$ son función del estado termodinámico local y de la composición del fluido.

Respecto a la conducción de calor, la ley de Fourier indica que el flujo de calor que atraviesa un elemento de superficie dS en la dirección del vector unitario normal $\vec{n}$ viene dado por

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} dS = -k(\nabla T \cdot \vec{n})dS \quad (12)$$

Donde k = conductividad térmica

∇T = gradiente de temperatura

$\vec{n}$ = vector normal a la superficie

Para calcular la cantidad de calor que se aporta por unidad de tiempo al volumen fluido debemos cambiar el signo para dar $\int_{S_f} k(\nabla T \cdot \vec{n})dS$ debido a que el vector normal $\vec{n}$ se dirige hacia el exterior y expresaría el calor que abandona el volumen fluido por unidad de tiempo a través de dS .

$$\dot{Q} = \int_{V_f} (\dot{q}_R + \dot{q}_Q) dV + \int_{S_f} k(\nabla T \cdot \vec{n})dS \quad (13)$$

Donde k = conductividad térmica

∇T = gradiente de temperatura

$\vec{n}$ = vector normal a la superficie

$\dot{q}_R$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la radiación

$\dot{q}_Q$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la reacción química

V_f = volumen fluido

Haciendo uso del Teorema de Transporte de Reynolds para calcular el trabajo de las fuerzas exteriores y el calor aportado por el fluido se obtiene

$$\int_{V_f} \frac{d}{dt} \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] dV + \int_{V_f} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \cdot \vec{n} dS =$$

$$= \int_{V_f} \vec{f}_v \cdot \vec{v} dV + \int_{S_f} \vec{v} \cdot \vec{\tau} \cdot \vec{n} dS - \int_{S_f} p \vec{v} \cdot \vec{n} dS + \int_{V_f} (\dot{q}_R + \dot{q}_Q) dV + \int_{S_f} k(\nabla T \cdot \vec{n}) dS \quad (14)$$

Donde ρ = densidad del medio

$e + \frac{1}{2} v^2$ = energía por volumen unitario

V_f = volumen fluido

$\vec{v}$ = velocidad

$\vec{n}$ = vector normal a la superficie

$\vec{f}_v$ = fuerza por unidad de volumen sobre una partícula fluida de volumen dV

p = presión

S_f = superficie fluido

$\vec{\tau}$ = tensor de esfuerzos viscosos

$\dot{q}_R$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la radiación

$\dot{q}_Q$ = calor por unidad de tiempo de volumen y tiempo debido a la reacción química

k = conductividad térmica

∇T = gradiente de temperatura

La variación temporal de la energía contenida en el volumen de control V_c , sumada a la cantidad de energía que lo abandona por unidad de tiempo debido al movimiento convectivo del fluido a través de su superficie S_c , es igual a la suma del trabajo por unidad de tiempo debido al movimiento convectivo del fluido a través de la superficie S_c , es igual a la suma del trabajo por unidad de tiempo ejercido por las fuerzas másicas que actúan en el interior del volumen V_c , el trabajo por unidad de tiempo de las fuerzas de presión y viscosas que actúan en la superficie S_c , el calor que se aporta por conducción por unidad de tiempo a través de dicha superficie y el calor que se aporta por radiación y reacción química en el interior de V_c .

2.1.1.5.2.2. Método de los Volúmenes Finitos.

El solucionador de ANSYS Fluent está basado en el método de los volúmenes finitos [36]. La ventaja es que se van cumpliendo los principios de conservación debido a que las integrales de superficie que se encuentran en los términos convectivos y difusivos son las mismas para cada celda en su frontera común.

El modelo es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control [29]. Las ecuaciones generales de conservación de la masa, cantidad de movimiento, energía, etc. son resueltas en este conjunto de volúmenes de control. En el centroide de cada volumen de control se encuentra un nodo donde se calcula el valor de las variables y en las fronteras se puede conocer el valor de ellas mediante interpolación. Después se continúa con una aproximación de las ecuaciones de conservación para determinar un sistema de ecuaciones algebraicas y obtener así su solución por métodos iterativos [35].

Partiendo de la ecuación de transporte general, obedeciendo las ecuaciones de Navier Stokes en la forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \vec{v} \Phi \cdot \vec{n} dA = \oint_A \rho \Gamma \nabla \Phi \cdot \vec{n} dA + \int_V S_\Phi dV \quad (15)$$

Donde Φ = variable transportada por un medio
 ρ = densidad del medio por el que se transporta Φ
 V = velocidad de desplazamiento de Φ por el medio
 Γ = constante de difusión del medio
 S_ϕ = término fuente/sumidero de la variable transportada
 A = frontera

El primer término corresponde con la variación temporal de la variable transportada por el medio dentro de un volumen, el segundo término corresponde con los flujos convectivos de la variable transportada a través de la frontera debido a la velocidad. El primer término después de la igualdad expresa el término difusivo de la variable transportada en la frontera que depende solamente del gradiente de dicha variable, y el último término se debe al término fuente de la variable en el interior del volumen.

El término fuente, S_ϕ de la ecuación (14) contendrá los términos de radiación calculados a través del modelo de ordenadas discretas (DO). Este modelo de radiación resuelve la ecuación de transferencia radiactiva para un número finito de ángulos sólidos discretos, que se encuentran asociados con un vector $\vec{s}$ en un sistema global cartesiano (x, y, z). El modelo DO transforma la ecuación de transporte radiactiva para un medio de absorción, emisión y disipación en la posición $\vec{r}$ y en la dirección $\vec{s}$ en una ecuación de transporte para la intensidad de radiación en las coordenadas espaciales (x, y, z). El método de resolución es igual que el usado para las ecuaciones de flujo y energía.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (16)$$

Donde $\vec{r}$ = vector posición
 $\vec{s}$ = vector dirección
 $\vec{s}'$ = vector dirección disipación
 s = longitud de la trayectoria

a = coeficiente de absorción

n = índice refractivo

σ_s = coeficiente de dispersión

σ = constante Stefan – Boltzmann ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \text{ K}^4$)

I = intensidad de radiación

T = temperatura local

Φ = función de fase

Ω' = ángulo sólido

Para unos volúmenes finitos y unas subfronteras que corresponden con la frontera del volumen se obtiene:

$$V_{\text{cell}} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{V}_f \Phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi \nabla \Phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi + V_{\text{cell}} \quad (17)$$

Las ecuaciones diferenciales son discretizadas en un sistema de ecuaciones algebraicas que son resueltas numéricamente para dar un campo de soluciones.

2.1.1.5.3 Ajustar las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se determinan para estudiar el comportamiento de la luminaria en determinados casos. Las condiciones de contorno se han determinado en el aire, que se encuentra envolviendo a la luminaria. Se ha querido simular varias temperaturas ambientales [17], tales como, 40°C, 20°C y -10°C, con una velocidad inicial ascendente de 0.02 m/s.

2.1.1.5.4 Determinar el solucionador del problema

ANSYS Fluent permite elegir uno de los dos métodos numéricos:

- Solucionador basado en presión
- Solucionador basado en densidad

En ambos métodos, el campo de velocidad se obtiene a partir de las ecuaciones de momento. En el enfoque basado en densidad, la ecuación de

continuidad se usa para obtener el campo de densidad, mientras que el campo de presión se determina a partir de la ecuación de estado [36].

Por otro lado, en el enfoque basado en la presión, el campo de presión se extrae resolviendo una ecuación de corrección de presión o presión que se obtiene al manipular las ecuaciones de continuidad y de momento [36].

Usando cualquiera de los dos métodos, ANSYS Fluent resolverá las ecuaciones integrales que gobiernan para la conservación de la masa y el momento, y (cuando sea apropiado) para la energía y otros escalares, como la turbulencia y las especies químicas. En ambos casos se utiliza una técnica basada en control-volumen que consiste en:

- División del dominio en volúmenes de control discretos utilizando una cuadrícula computacional.
- Integración de las ecuaciones de control en los volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas (incógnitas) como las velocidades, la presión, la temperatura y los escalares conservados.
- Linealización de las ecuaciones discretizadas y solución del sistema de ecuaciones lineales resultantes para obtener valores actualizados de las variables dependientes.
- Los dos métodos numéricos emplean un proceso de discretización similar (volumen finito), pero el enfoque utilizado para linealizar y resolver las ecuaciones discretizadas es diferente.

En nuestro caso se utilizará el solucionador basado en presión, que emplea un algoritmo que pertenece a una clase general de métodos llamado método de proyección. En el método de proyección, en el que la restricción de la conservación de masa (continuidad) del campo de velocidad se logra resolviendo una ecuación de presión (o corrección de presión). La ecuación de presión se deriva de las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento de tal manera que el campo

de velocidad, corregido por la presión, satisface la continuidad. Dado que las ecuaciones de control no son lineales y están acopladas entre sí, el proceso de solución implica iteraciones en las que todo el conjunto de ecuaciones de control se resuelve repetidamente hasta que la solución converge.

Hay dos algoritmos de solución basados en presión disponibles en ANSYS Fluent. Un algoritmo segregado, y un algoritmo acoplado.

- **El algoritmo segregado basado en la presión**

El solucionador basado en la presión utiliza un algoritmo de solución donde las ecuaciones que gobiernan se resuelven secuencialmente (es decir, se segregan unas de otras). Debido a que las ecuaciones de control no son lineales y están acopladas, el bucle de solución debe llevarse a cabo de manera iterativa para obtener una solución numérica convergente.

En el algoritmo segregado, se resuelven las ecuaciones de gobierno individuales para las variables de la solución (por ejemplo, u , v , w , p , T , k , etc.) Uno después del otro. Cada ecuación gobernante, mientras se resuelve, se "desacopla" o "se separa" de otras ecuaciones, de ahí su nombre. El algoritmo segregado es eficiente en memoria, ya que las ecuaciones discretizadas solo necesitan almacenarse en la memoria una a la vez. Sin embargo, la convergencia de la solución es relativamente lenta, ya que las ecuaciones se resuelven de manera desacoplada.

Con el algoritmo segregado, cada iteración consiste en los pasos ilustrados en la figura 36 y se describen a continuación:

1. Actualiza las propiedades del fluido (por ejemplo, densidad, viscosidad, calor específico), incluida la viscosidad turbulenta (difusividad) basada en la solución actual.

2. Resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento, una tras otra, utilizando los valores recientemente actualizados de los flujos de masa de presión y de cara.
3. Resuelve la ecuación de corrección de presión utilizando el campo de velocidad recientemente obtenido y el flujo de masa.
4. Corrige los flujos de masa, la presión y el campo de velocidad utilizando la corrección de presión obtenida en el Paso 3.
5. Resuelve las ecuaciones para escalares adicionales, si las hay, como cantidades turbulentas, energía, especies e intensidad de radiación utilizando los valores actuales de las variables de la solución.
6. Actualiza los términos fuente que surgen de las interacciones entre diferentes fases (por ejemplo, el término fuente para la fase portadora debido partículas discretas).
7. Verifica la convergencia de las ecuaciones.

Estos pasos continúan hasta que se cumplen los criterios de convergencia.

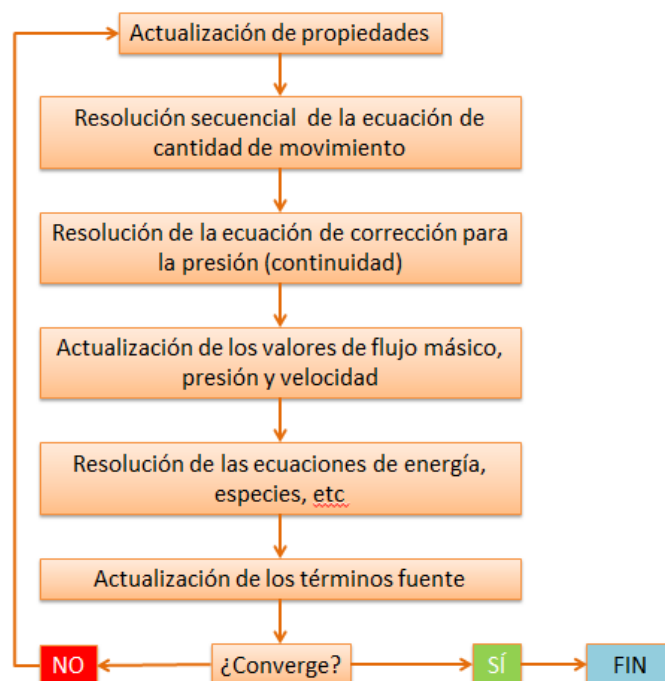


Figura 36. Método segregado basado en presión. Fuente: elaboración propia

- **El algoritmo acoplado basado en la presión**

A diferencia del algoritmo segregado descrito anteriormente, el algoritmo acoplado basado en la presión resuelve un sistema acoplado de ecuaciones que comprende las ecuaciones de momento y la ecuación de continuidad basada en la presión. Así, en el algoritmo acoplado, los pasos 2 y 3 en el algoritmo de solución segregada se reemplazan por un solo paso en el que se resuelve el sistema acoplado de ecuaciones. Las ecuaciones restantes se resuelven de manera desacoplada como en el algoritmo segregado, como se muestra en la figura 37.

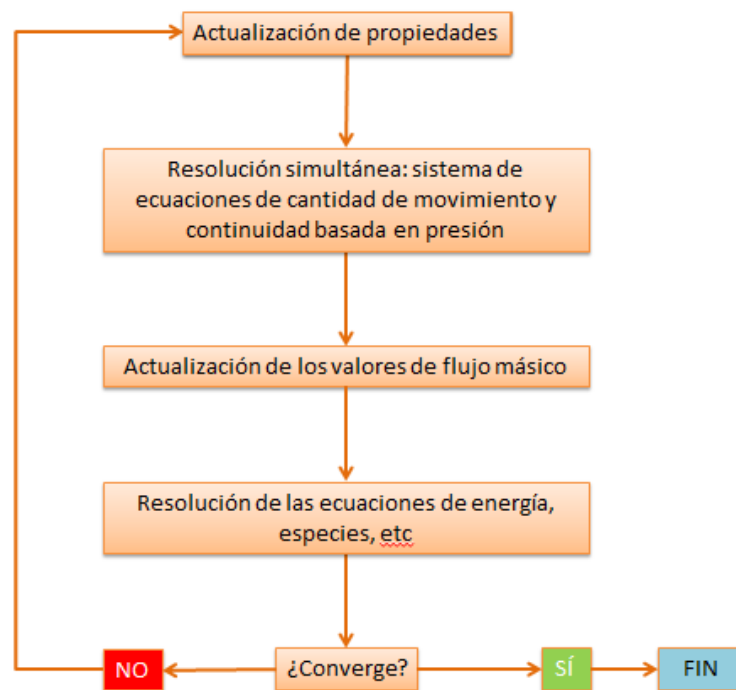


Figura 37. Método acoplado basado en la presión. Fuente: elaboración propia

Dado que las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad se resuelven de manera estrechamente acoplada, la tasa de convergencia de la solución mejora significativamente en comparación con el algoritmo segregado. Sin embargo, el requisito de memoria aumenta en 1,5 a 2 veces el del algoritmo segregado, ya que el sistema discreto de todas las ecuaciones de continuidad basadas en la cantidad de movimiento y la presión debe almacenarse en la memoria

al resolver los campos de velocidad y presión (en lugar de solo una ecuación, como es el caso del algoritmo segregado).

En esta simulación se tendrá en cuenta el algoritmo acoplado basado en la presión, por la potencia del equipo utilizado y la memoria disponible. La convergencia con este algoritmo mejora respecto al algoritmo segregado lo cual es tenido en cuenta para elegir este método [36].

2.1.1.5.5 Monitorear los residuales

El residual es una de las medidas más fundamentales de la convergencia de una solución iterativa, ya que cuantifica directamente el error en la solución del sistema de ecuaciones. En un análisis de CFD, el residuo mide el desequilibrio local de una variable conservada en cada volumen de control. Por lo tanto, cada celda de su modelo tendrá su propio valor residual para cada una de las ecuaciones que se resuelven.

En una solución numérica iterativa, el residual nunca será exactamente cero. Sin embargo, cuanto más bajo sea el valor residual, más precisa numéricamente será la solución.

Para CFD, se considera que los niveles de residual de 10^{-4} están ligeramente convergentes, los niveles de 10^{-5} se consideran bien convergentes y los niveles de 10^{-6} se consideran estrechamente convergentes. Sin embargo, para problemas complicados, no siempre es posible alcanzar niveles residuales tan bajos como 10^{-6} o incluso 10^{-5} [36].

2.1.2. Procesado

No hay métricas universales para juzgar la convergencia. Las definiciones residuales que son útiles para una clase de problema a veces son engañosas para otras clases de problemas. Por lo tanto, es una buena idea juzgar la convergencia no solo mediante el examen de los niveles residuales, sino también mediante el

monitoreo de cantidades integradas relevantes, como el coeficiente de transferencia de calor o de arrastre [36].

En el presente análisis se ha tenido en cuenta la continuidad, velocidad en x, velocidad en y, velocidad en z, energía y DO con un criterio de convergencia 10^{-3} , 10^{-3} , 10^{-3} , 10^{-6} y 10^{-5} respectivamente.

El tiempo de los cálculos iterativos fue de 144 horas para ambos modelos y 3 simulaciones por modelo con un procesador Intel Xeon CPU e5-2640 v2 @ 2.00ghz y una memoria RAM total de 48 Gb y utilizando procesamiento en paralelo.

2.1.3. Post procesado

Se examinan los resultados para revisar la solución y extraer algunos datos de importancia. La herramienta utilizada es Altair HyperView, es un entorno completo de post procesamiento y visualización para CFD. Se permite visualizar los datos de manera interactiva.

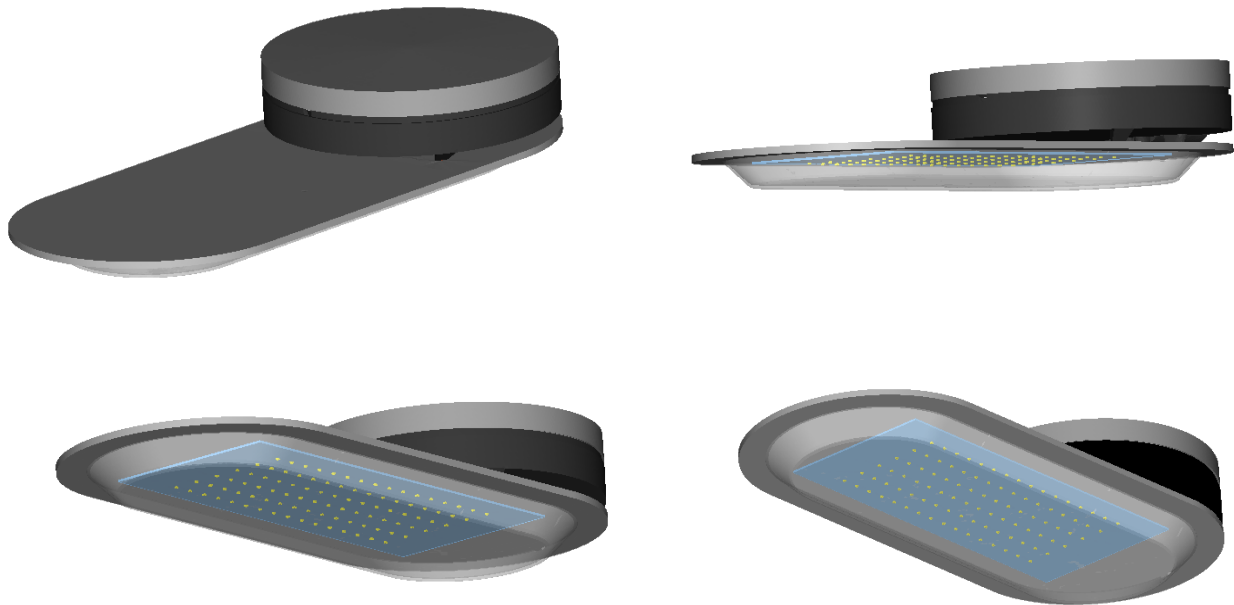


Figura 38. Conjunto de vistas Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

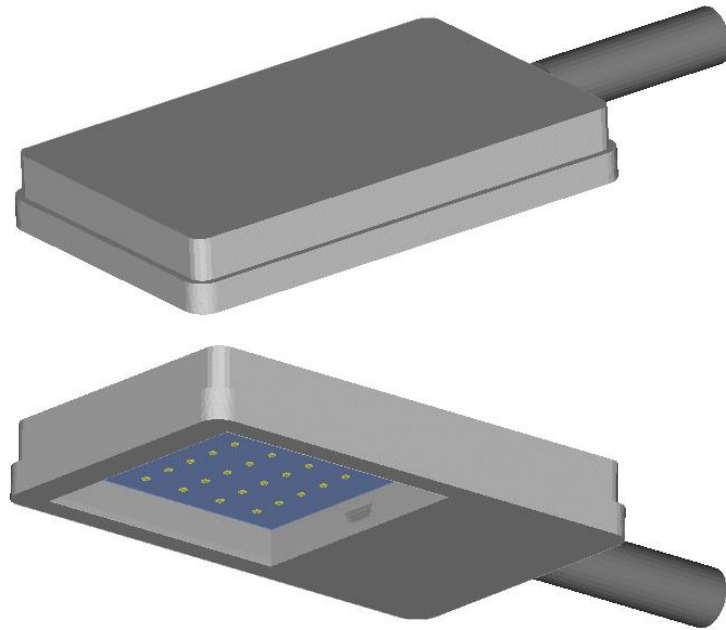
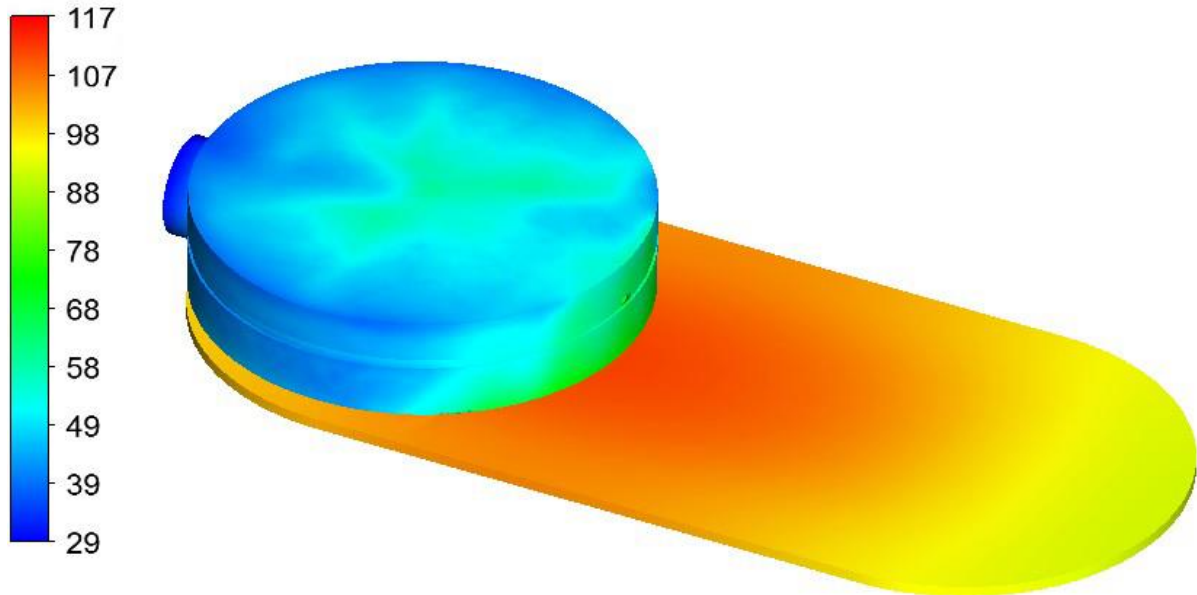


Figura 39. Conjunto de vistas Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERMESH

2.1.3.1. Visualización de la temperatura y velocidad en la luminaria Modelo A a 20°C

LUMINARIA. Temperatura °C



LUMINARIA. Temperatura °C

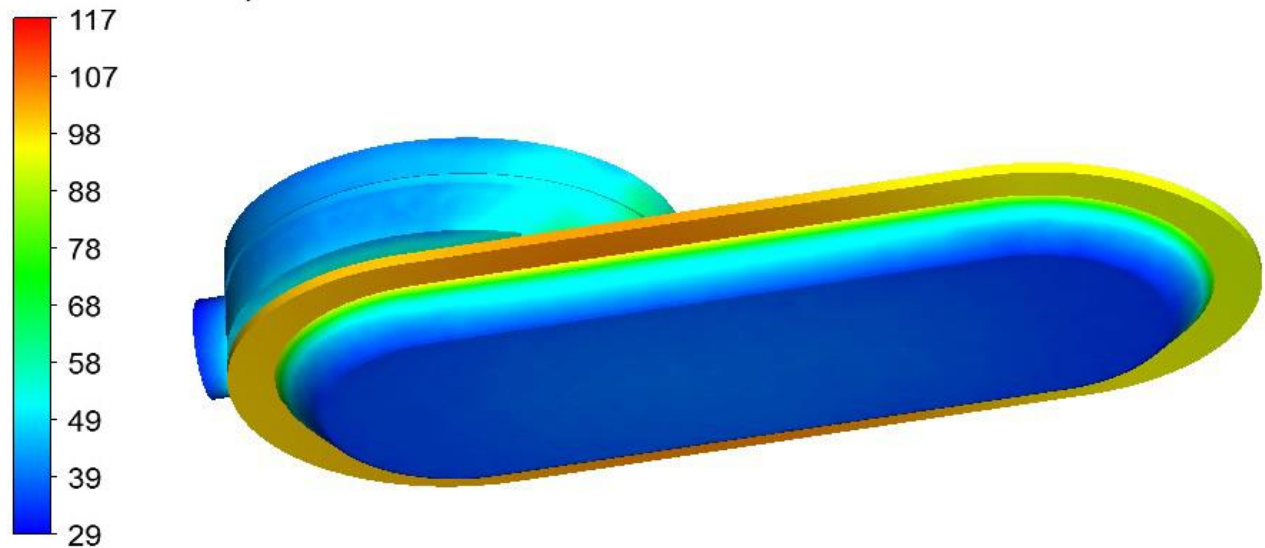


Figura 40. Temperatura general Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

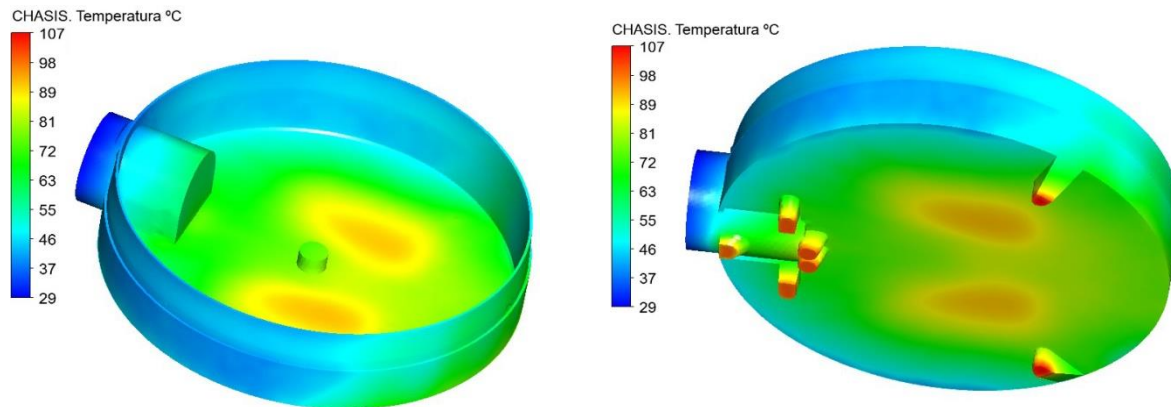


Figura 41. Temperatura Chasis Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

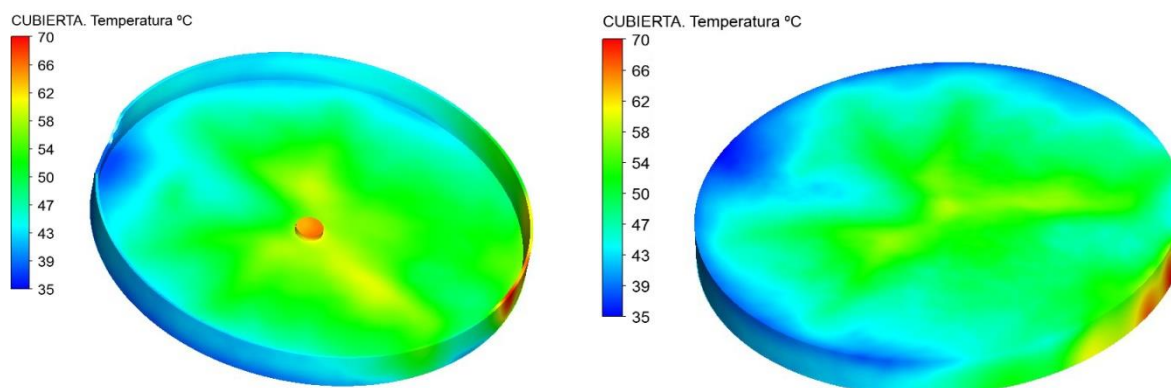


Figura 42. Temperatura Cubierta Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

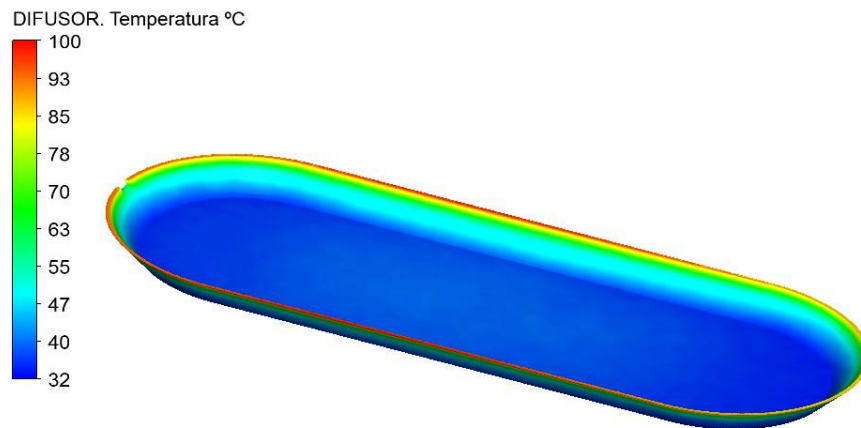


Figura 43. Temperatura Difusor Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

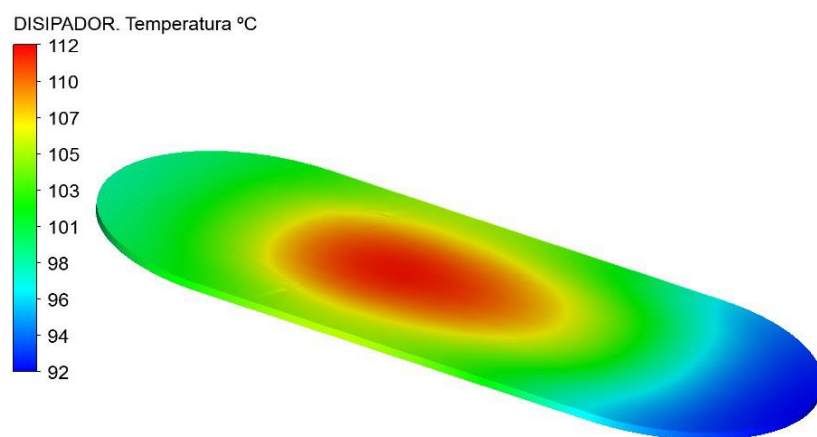


Figura 44. Temperatura Disipador Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

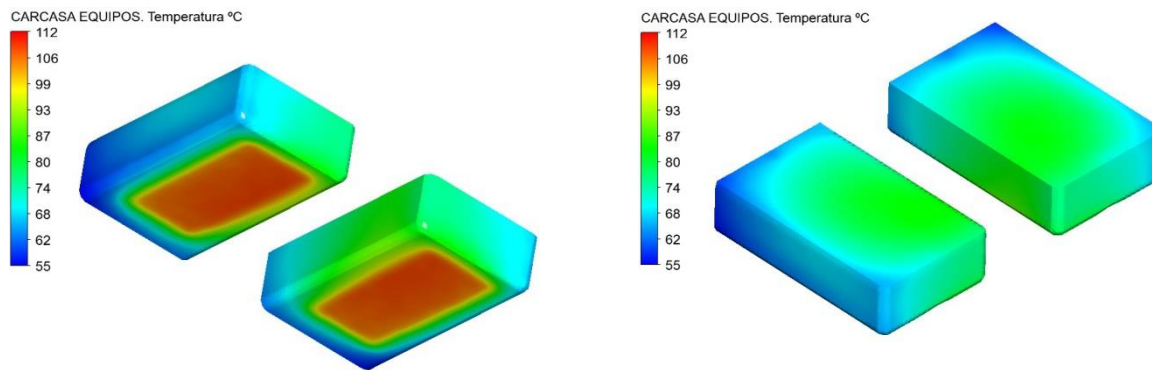


Figura 45. Temperatura Carcasa de equipos Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

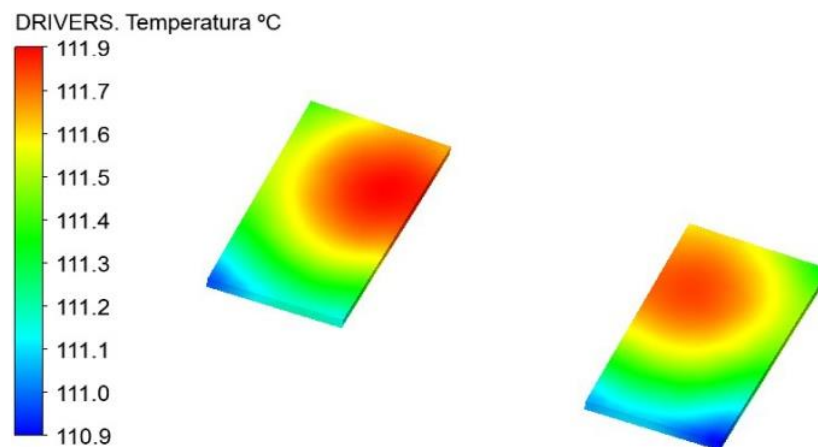


Figura 46. Temperatura Drivers Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a
partir del software HYPERVIEW

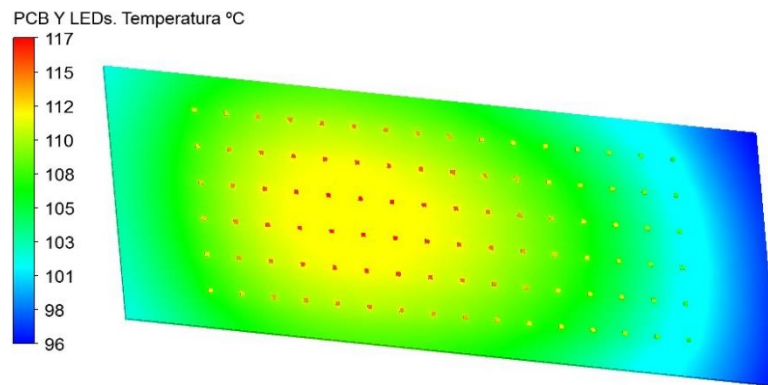


Figura 47. Temperatura PCB y LED Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

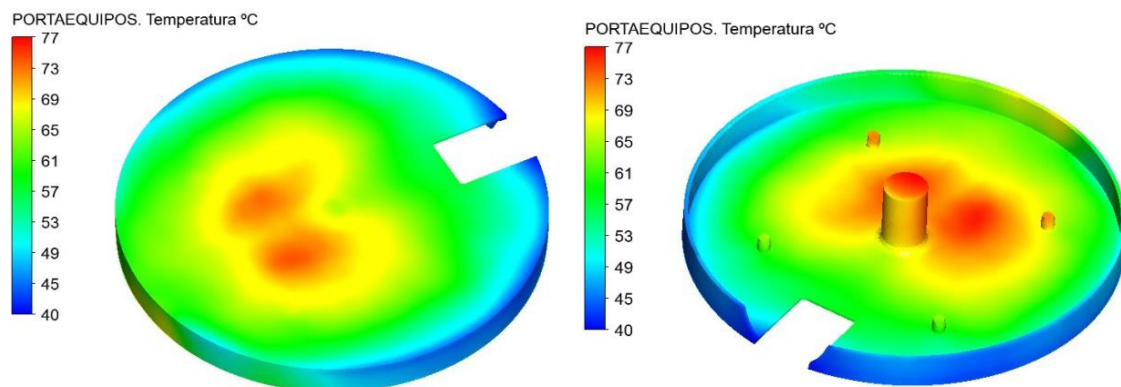


Figura 48. Temperatura Portaequipos Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

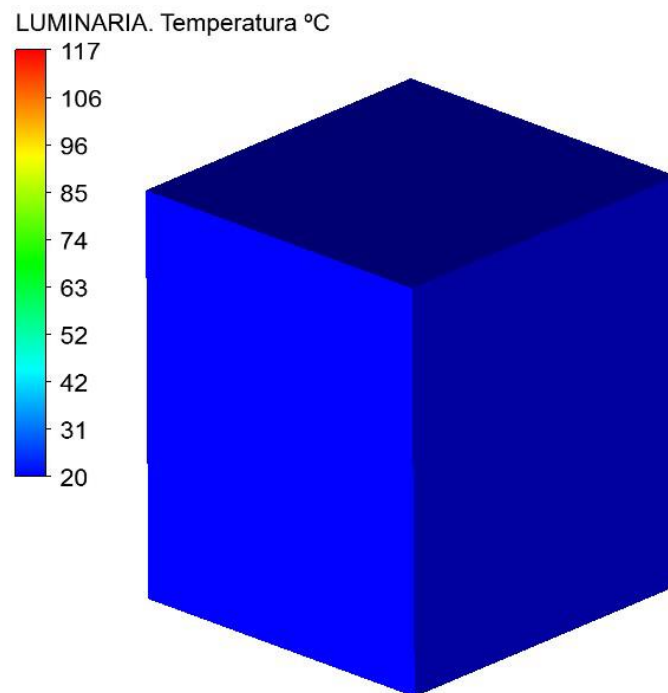


Figura 49. Temperatura Aire Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

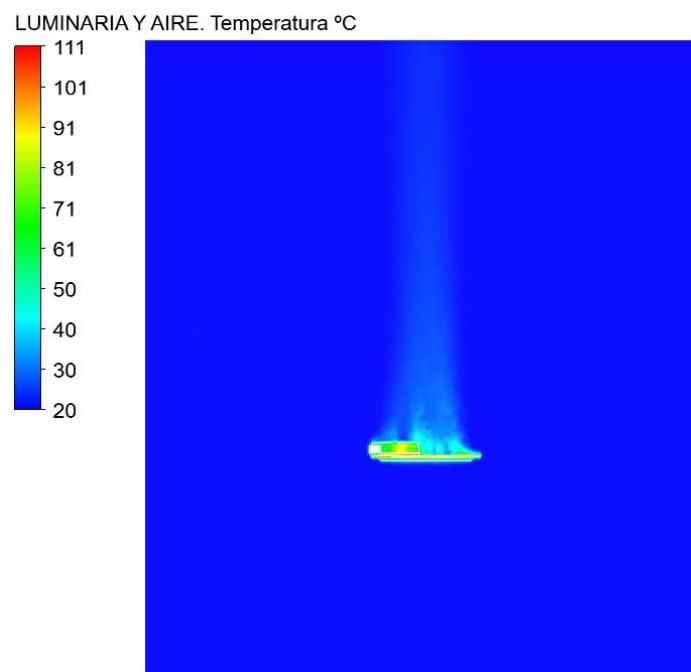


Figura 50. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

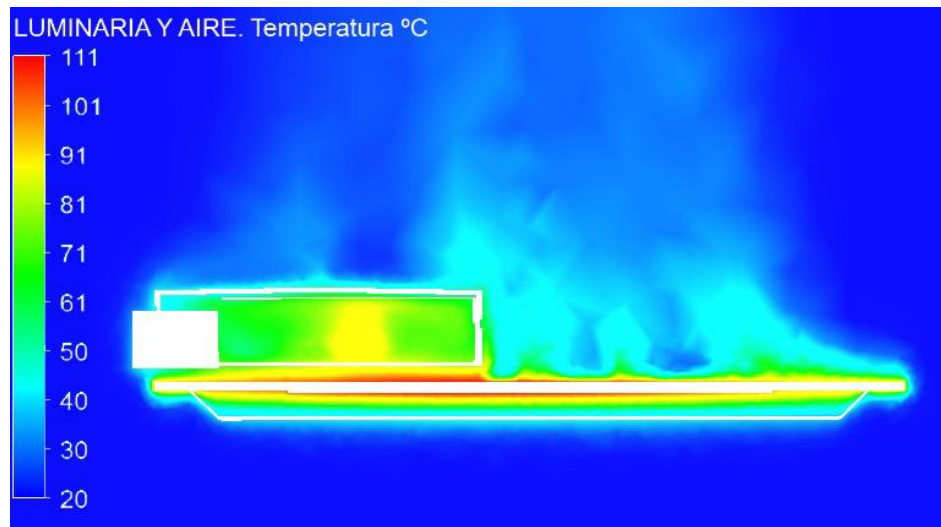


Figura 51. Temperatura Sección Media Aire Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

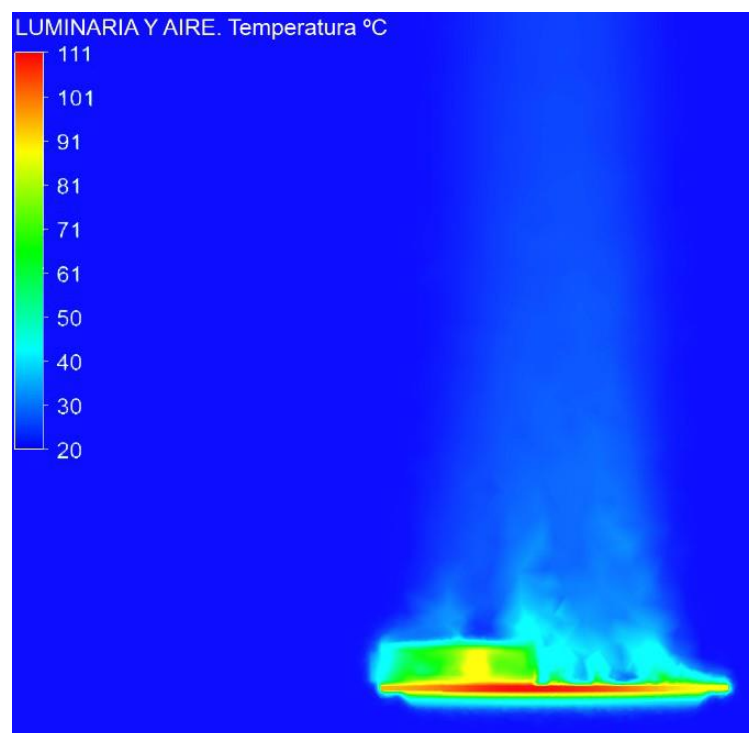


Figura 52. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

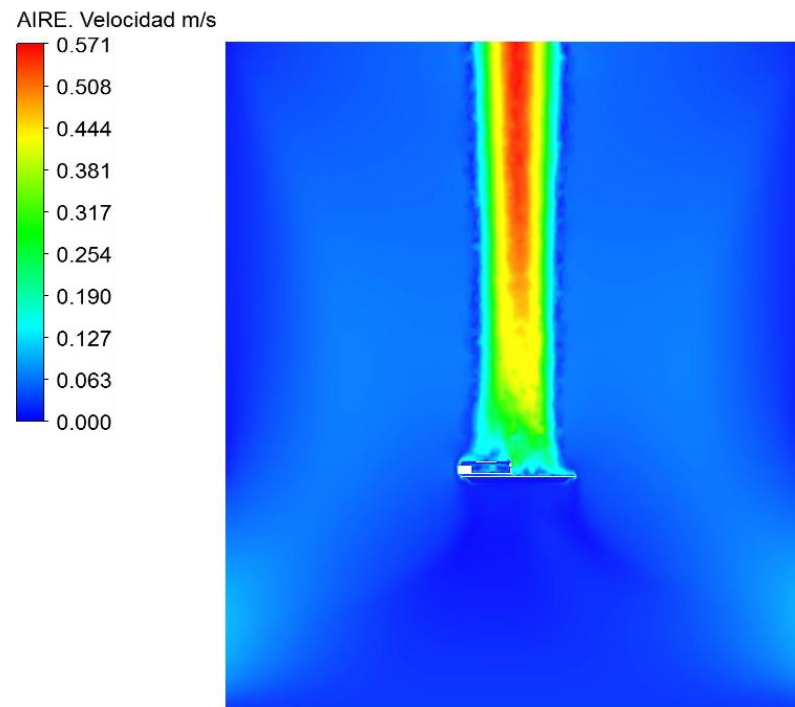


Figura 53. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

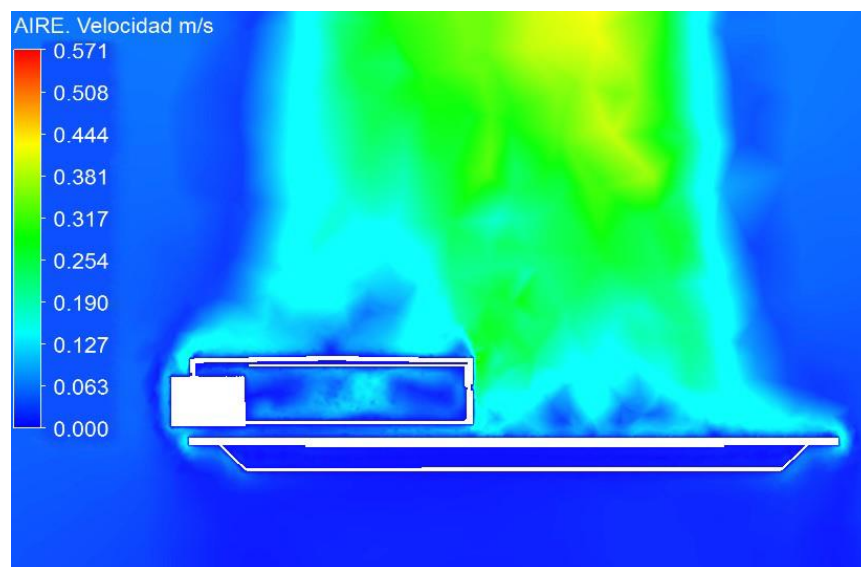


Figura 54. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

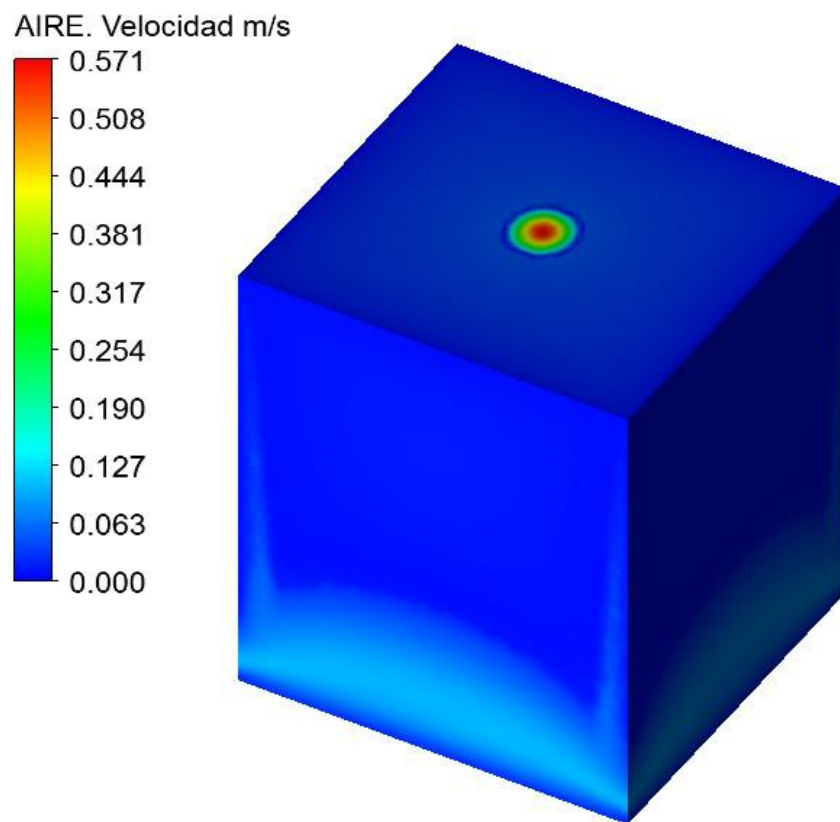


Figura 55. Velocidad Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.2. Visualización de la temperatura y velocidad en la luminaria Modelo A a 40°C

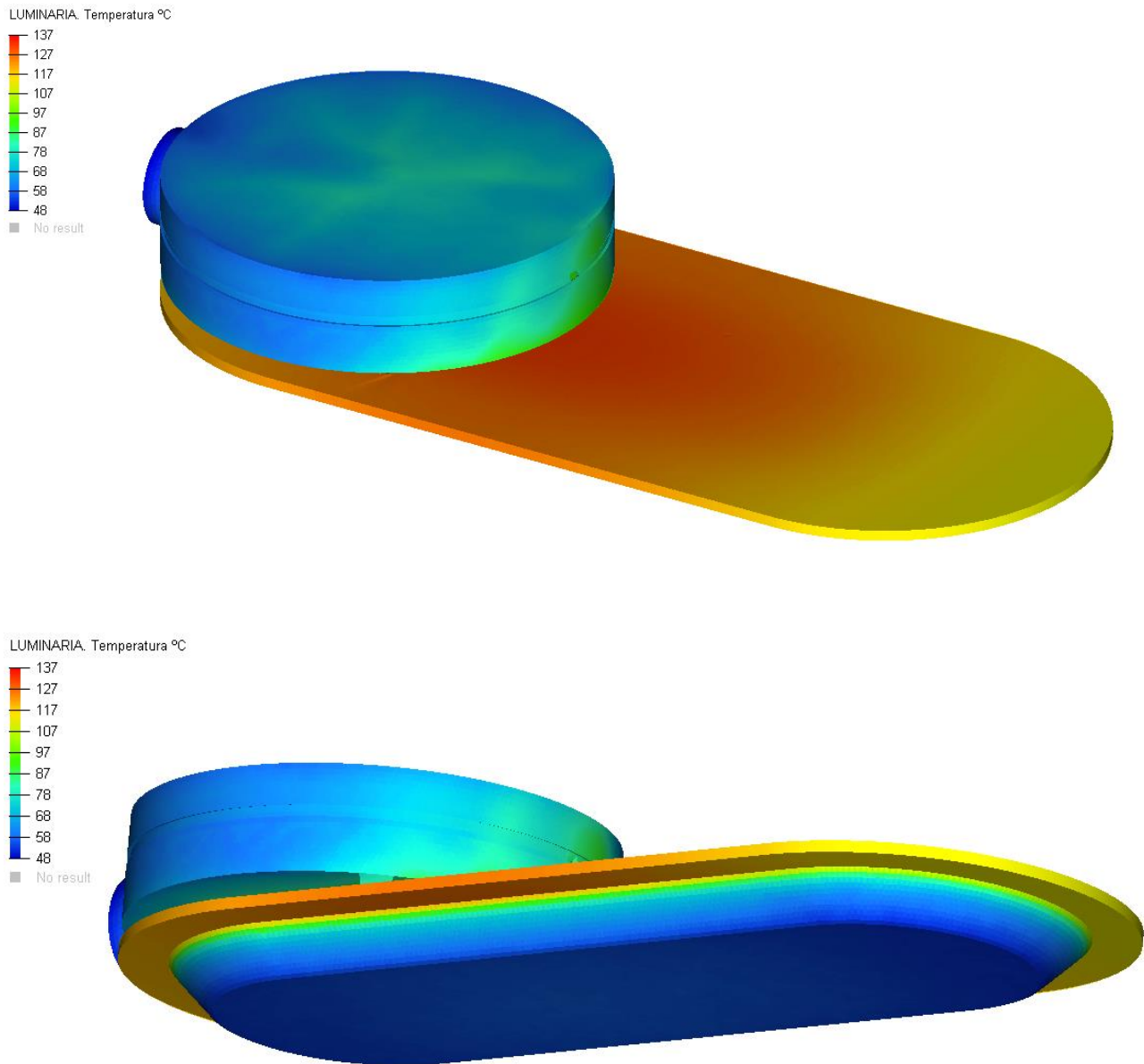


Figura 56. Temperatura general Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

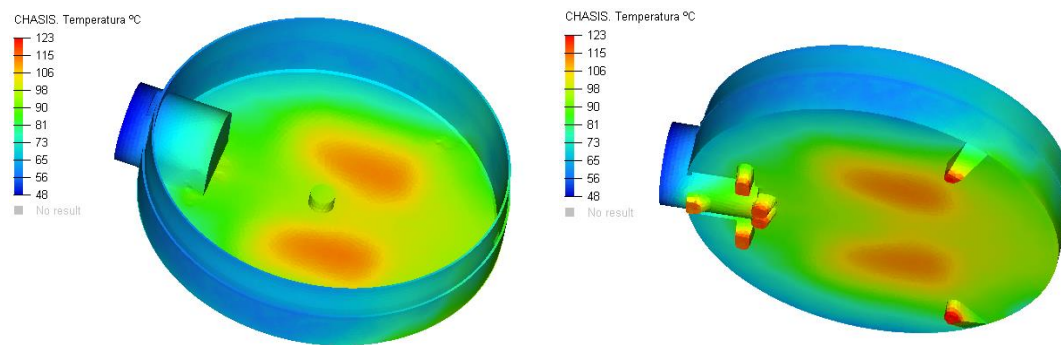


Figura 57. Temperatura Chasis Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

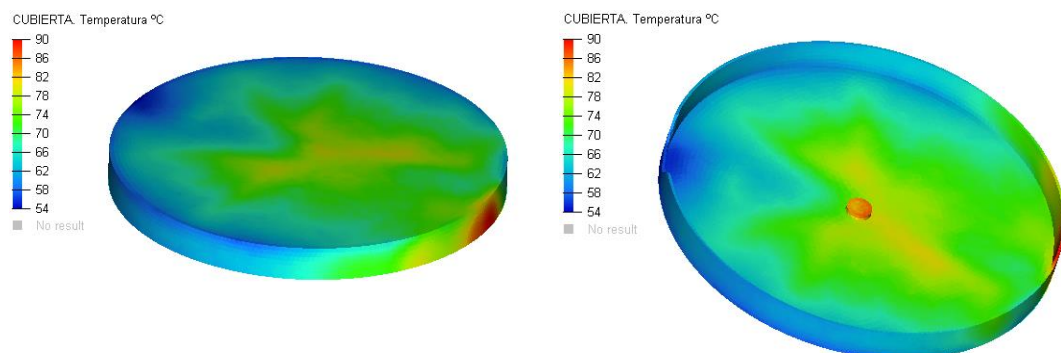


Figura 58. Temperatura Cubierta Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

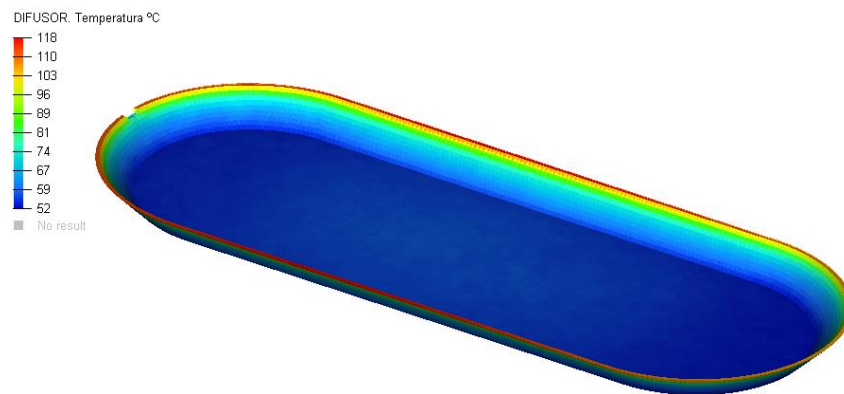


Figura 59. Temperatura Difusor Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

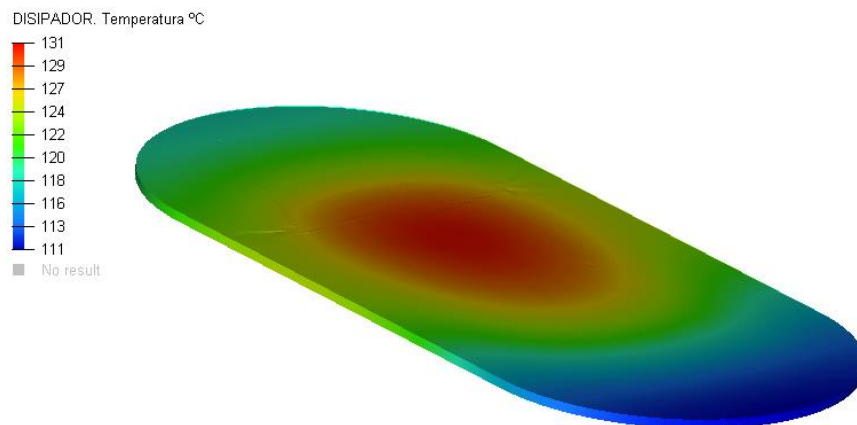


Figura 60. Temperatura Disipador Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

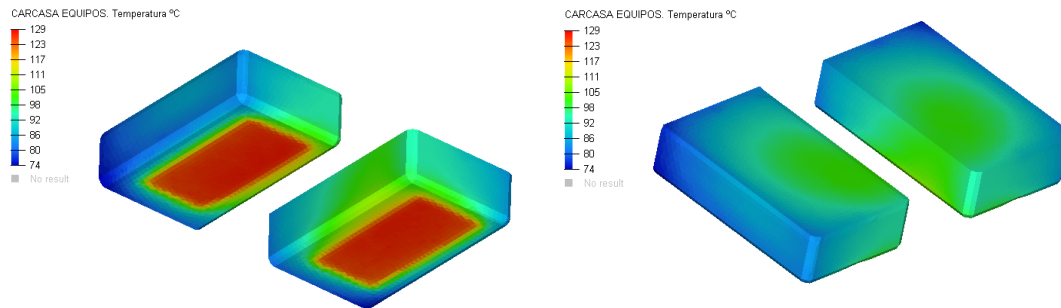


Figura 61. Temperatura Carcasa de equipos Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

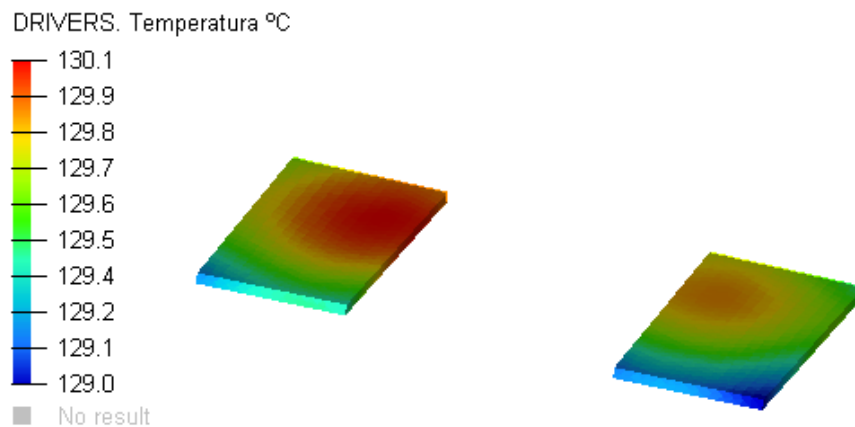


Figura 62. Temperatura Drivers Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a
partir del software HYPERVIEW

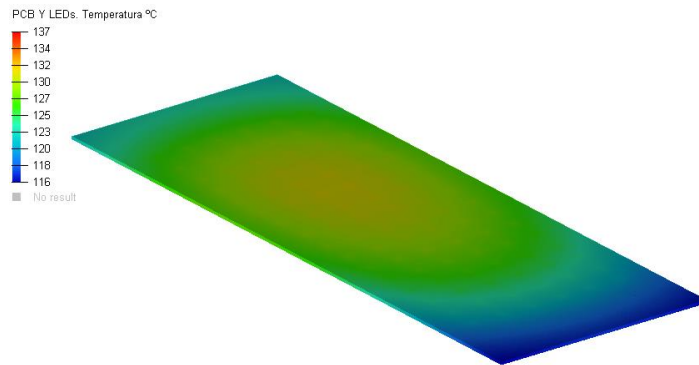


Figura 63. Temperatura PCB y LED Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

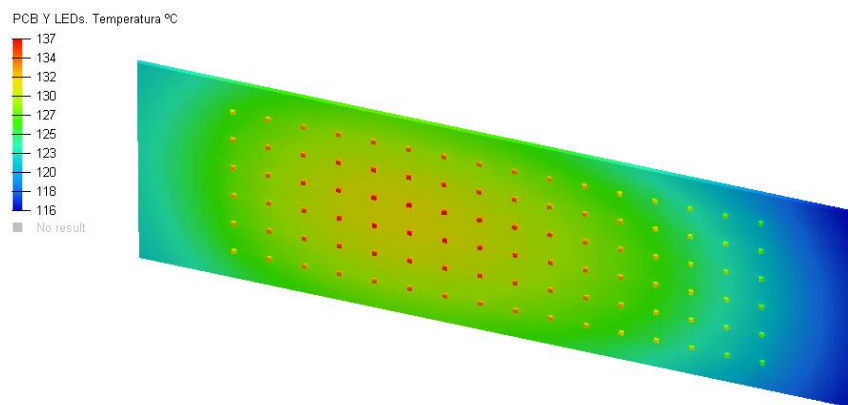


Figura 64. Temperatura PCB Y LED Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

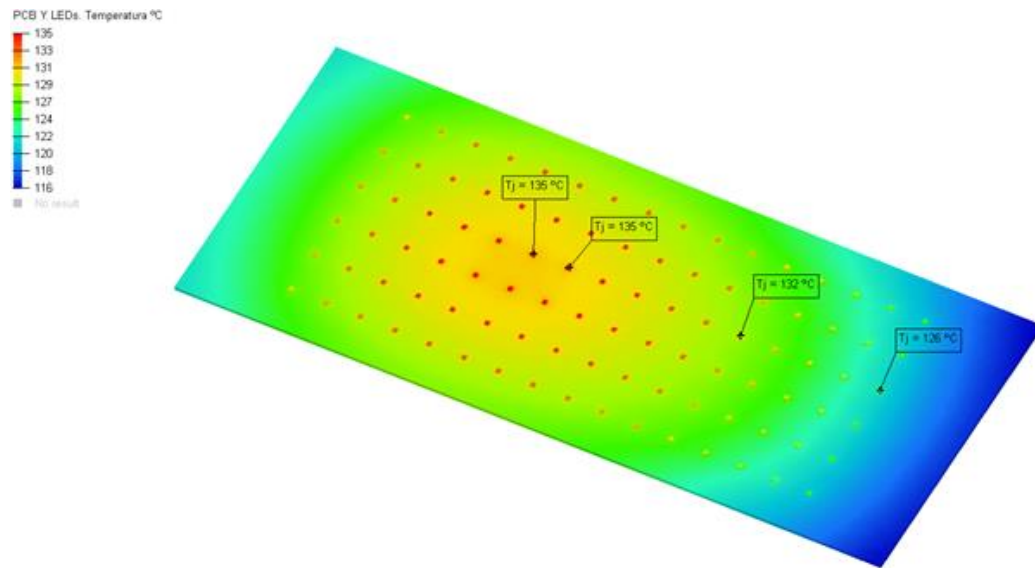


Figura 65. Temperatura PCB Y LED. T_j . Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

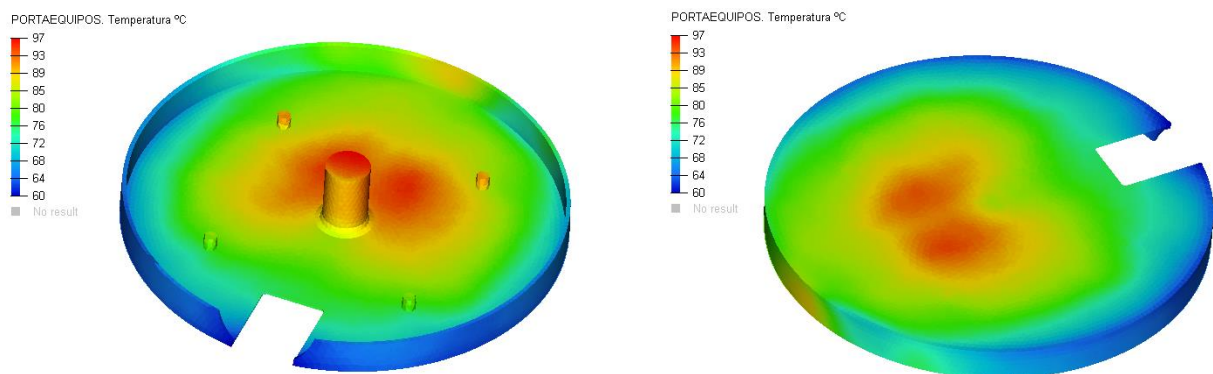


Figura 66. Temperatura Portaequipos Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

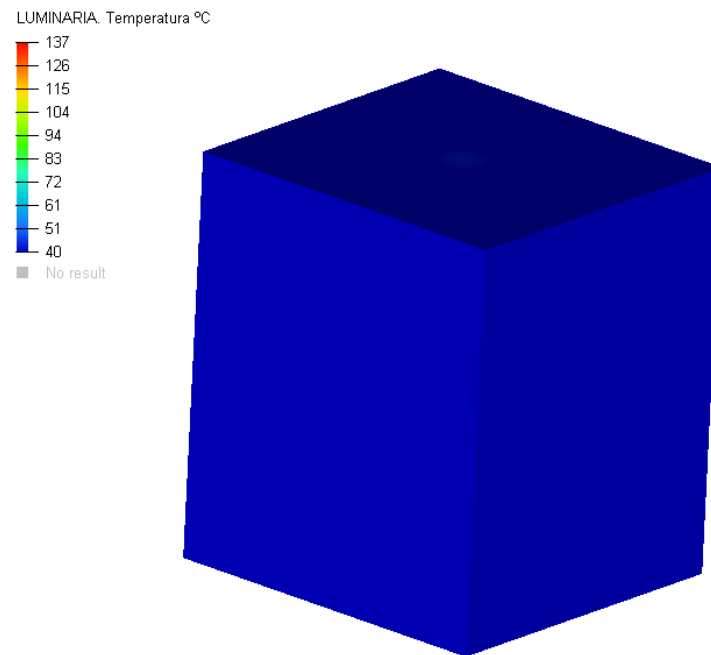


Figura 67. Temperatura Aire Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

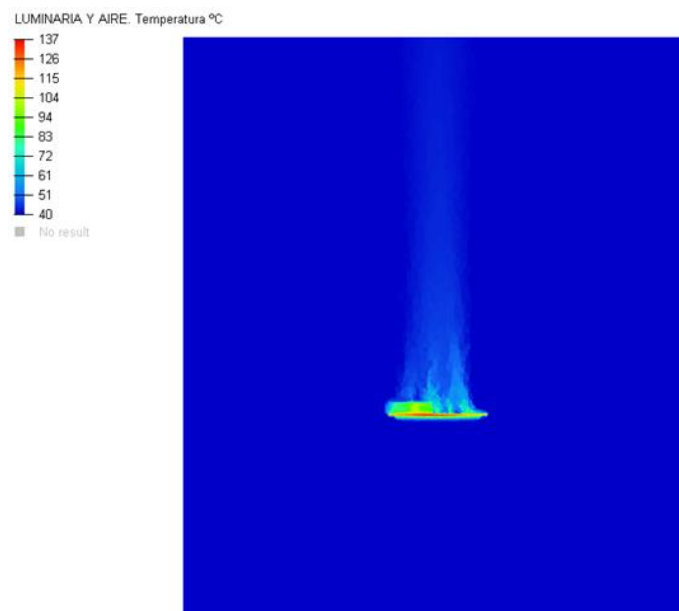


Figura 68. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

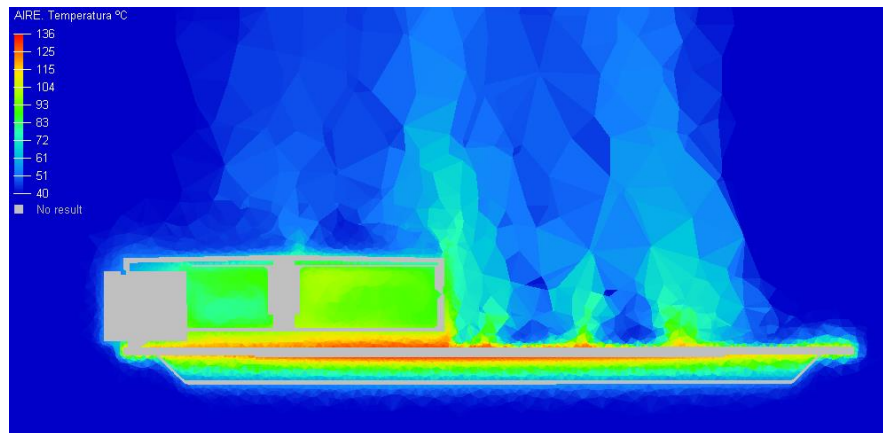


Figura 69. Temperatura Sección Media Aire Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

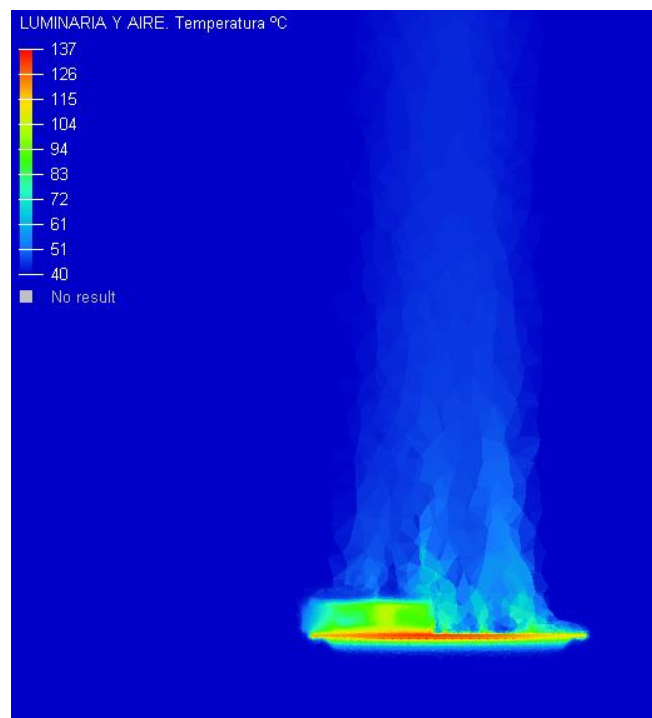


Figura 70. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

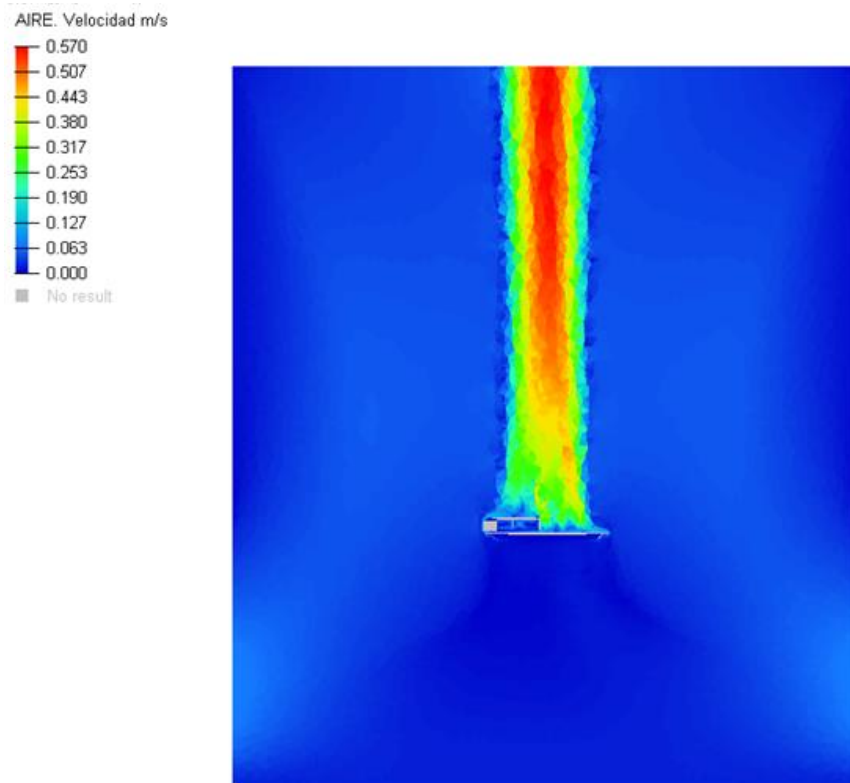


Figura 71. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

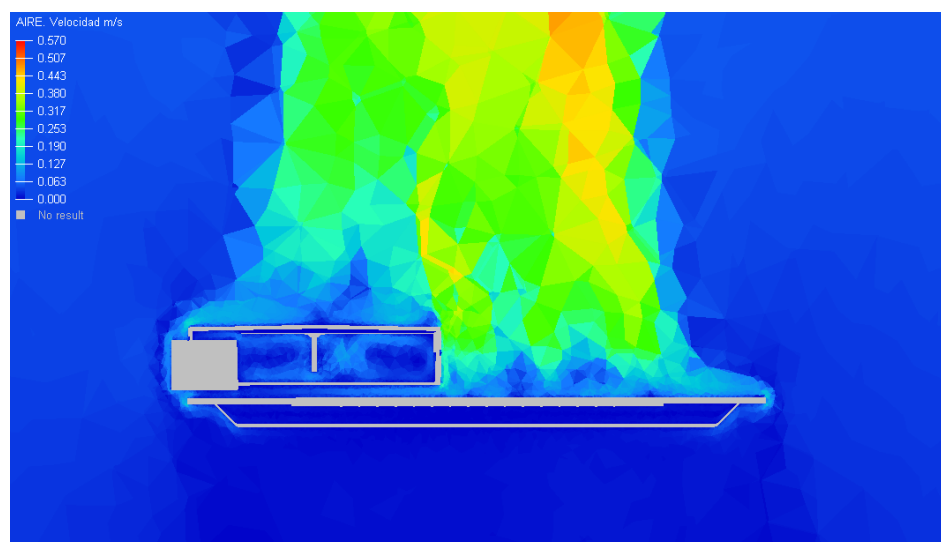


Figura 72. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

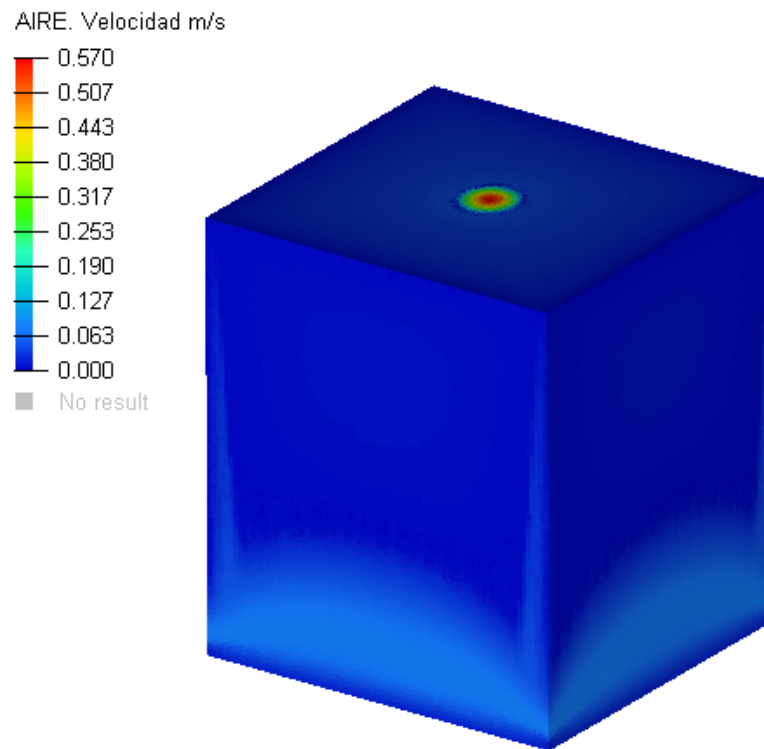


Figura 73. Velocidad Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.3. Visualización de la temperatura y velocidad en la luminaria Modelo A a -10°C

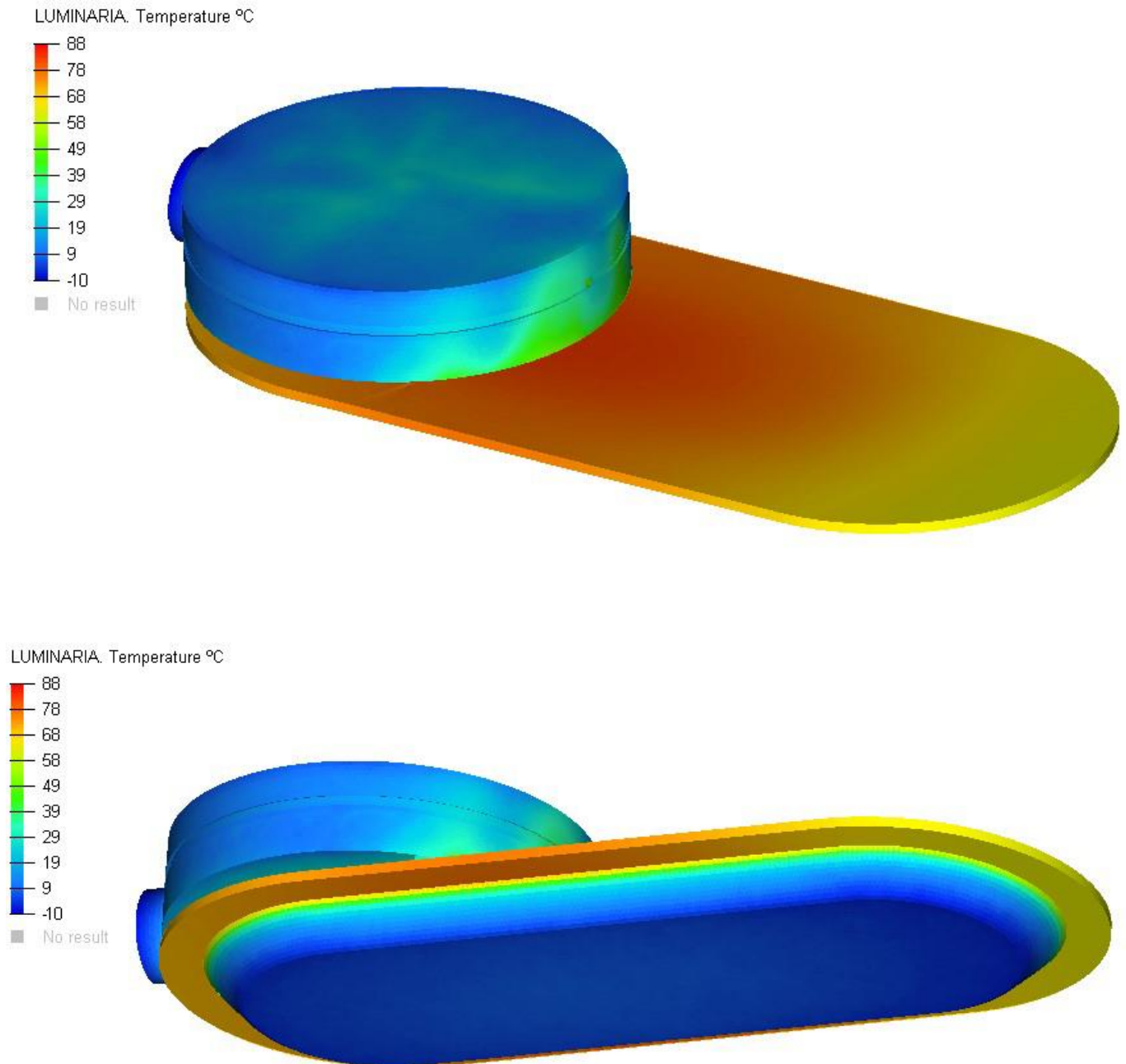


Figura 74. Temperatura general Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

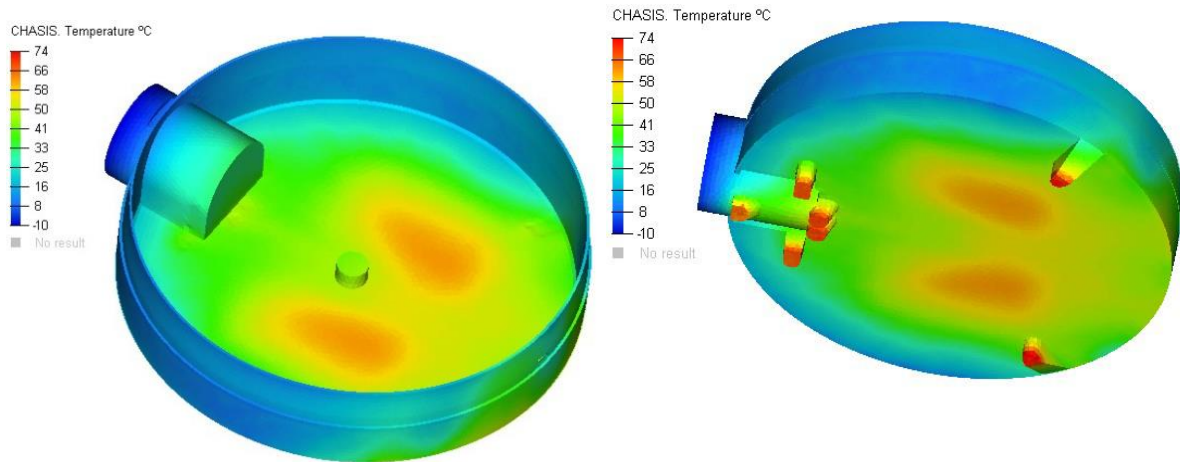


Figura 75. Temperatura Chasis Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

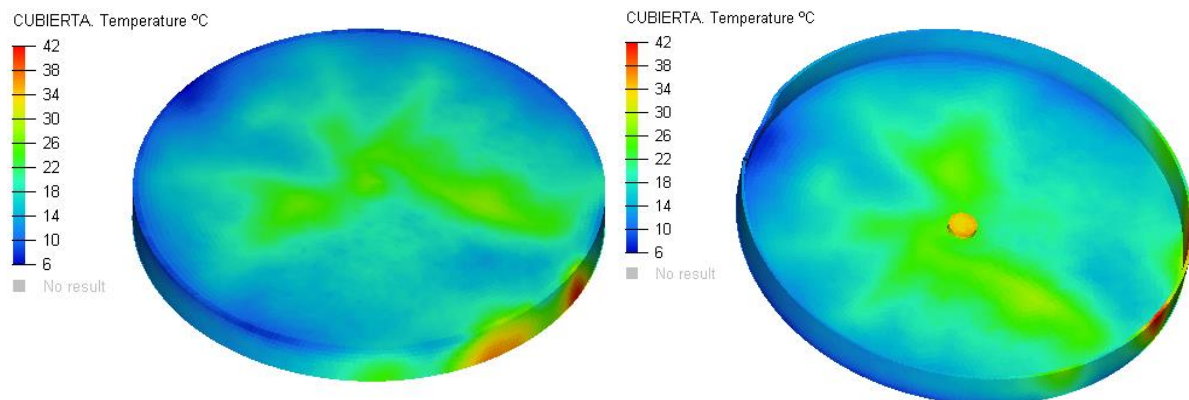


Figura 76. Temperatura Cubierta Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

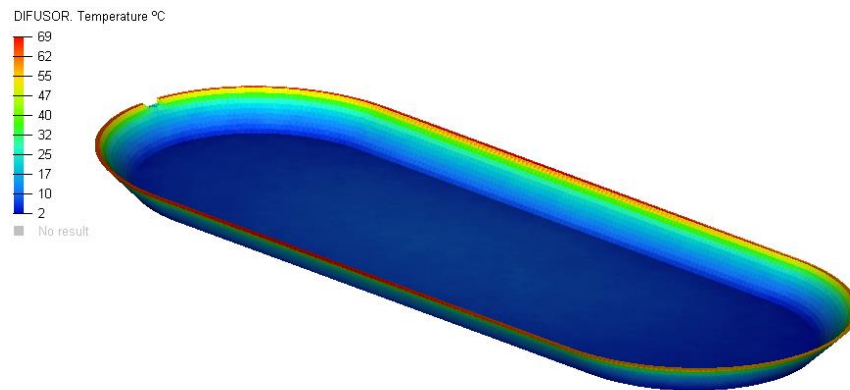


Figura 77. Temperatura Difusor Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

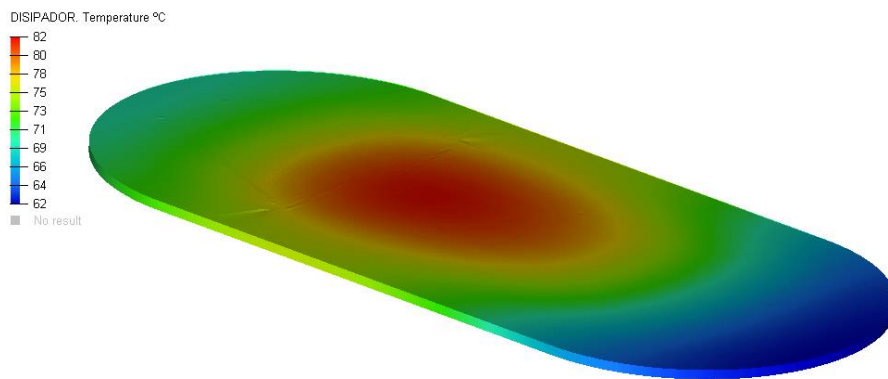


Figura 78. Temperatura Disipador Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

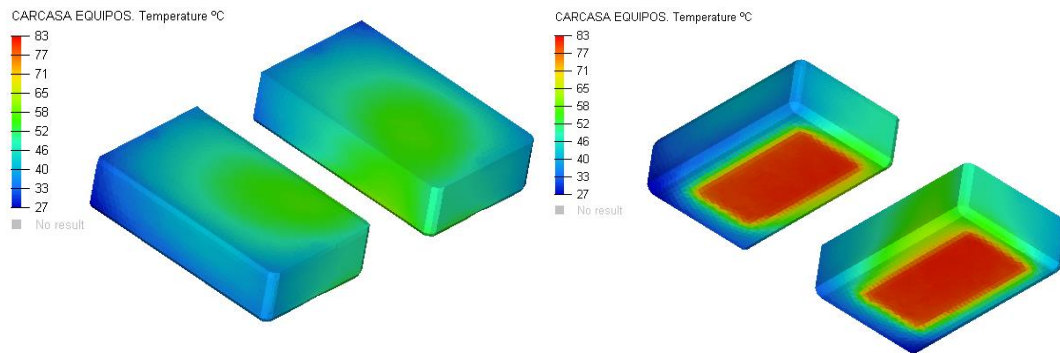


Figura 79. Temperatura Carcasa de equipos Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

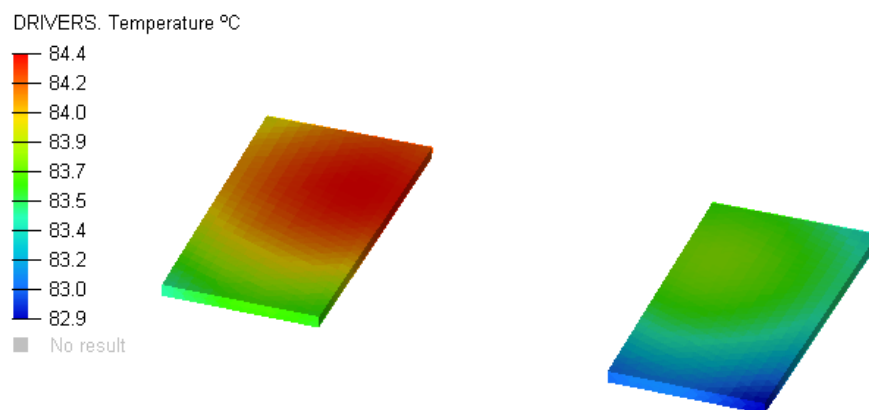


Figura 80. Temperatura Drivers Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

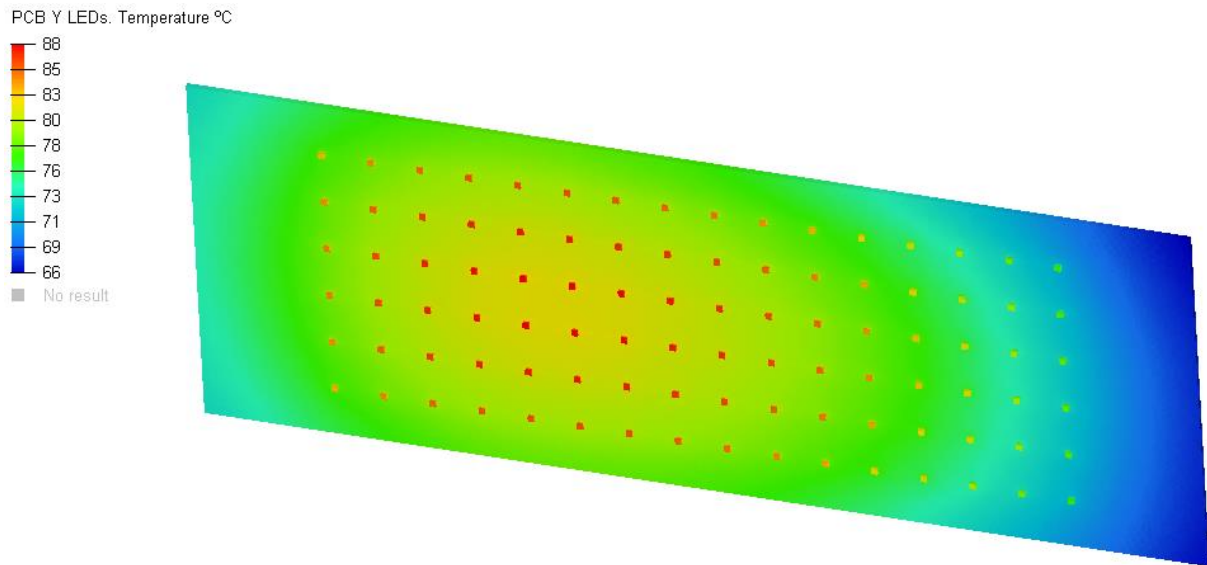


Figura 81. Temperatura PCB Y LED Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

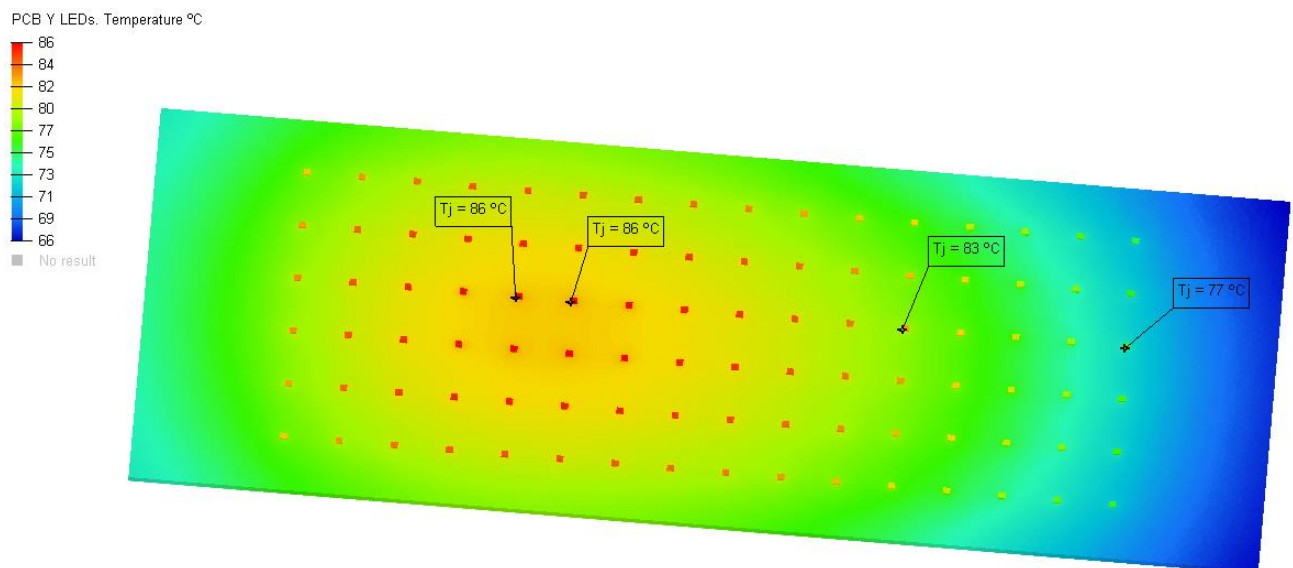


Figura 82. Temperatura PCB Y LED. T_J . Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

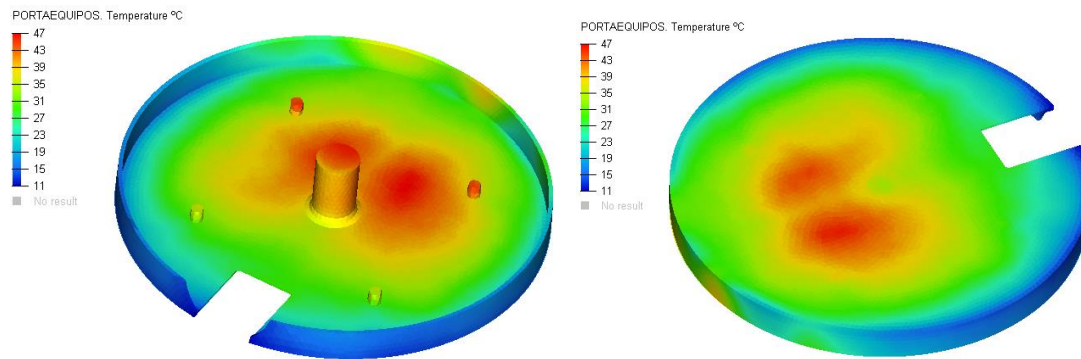


Figura 83. Temperatura Portaequipos Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

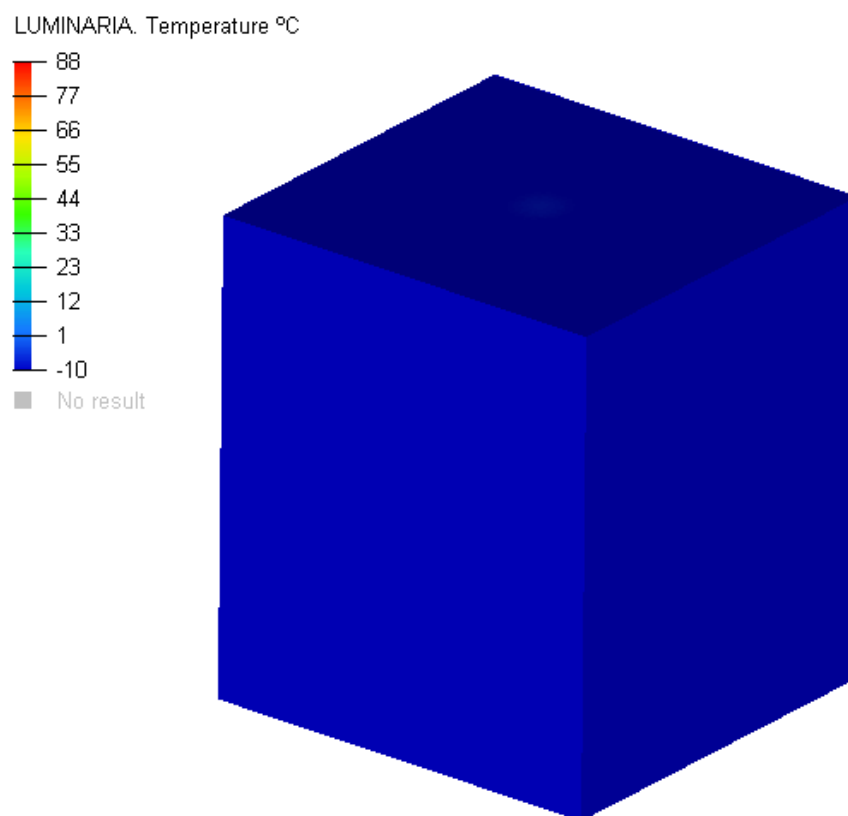


Figura 84. Temperatura Aire Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

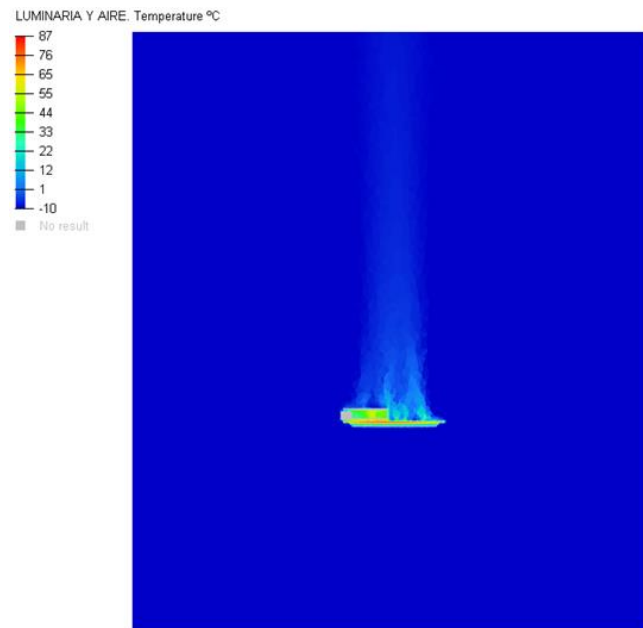


Figura 85. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

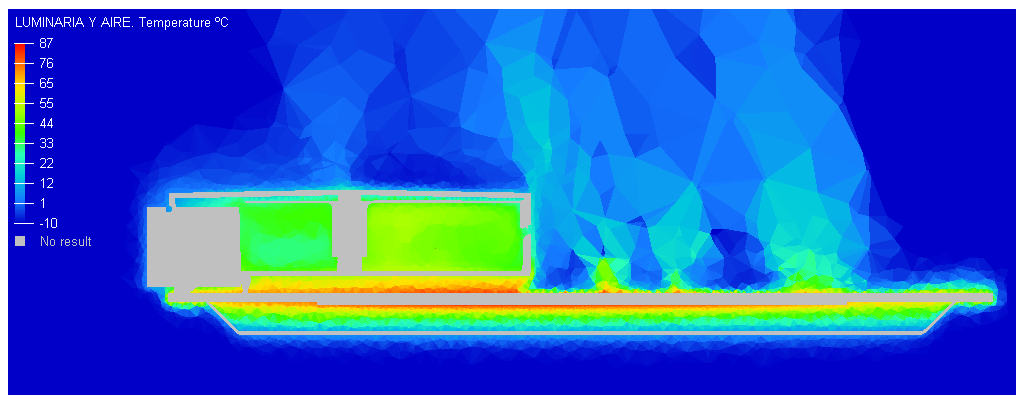


Figura 86. Temperatura Sección Media Aire Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

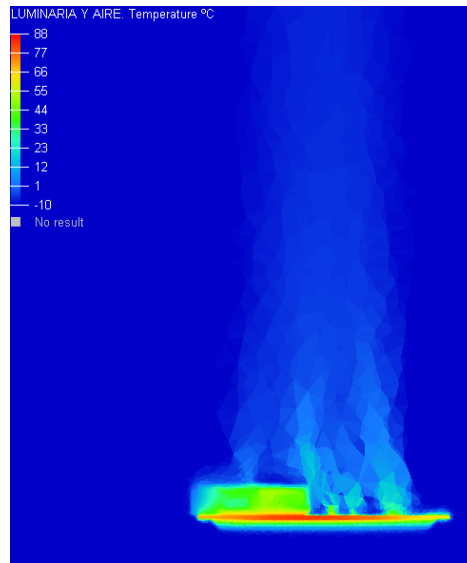


Figura 87. Temperatura Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente:
Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

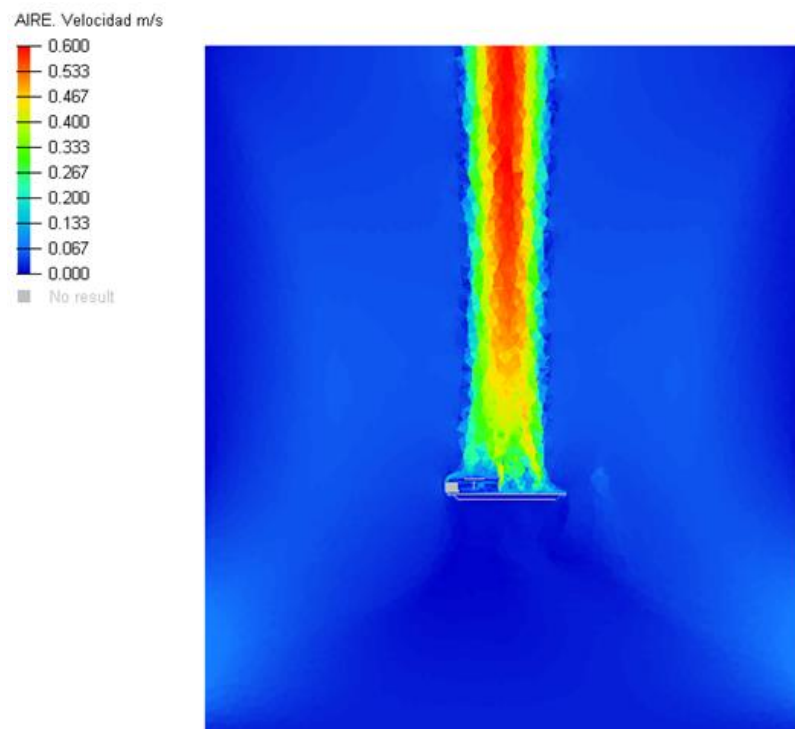


Figura 88. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración
propia a partir del software HYPERVIEW

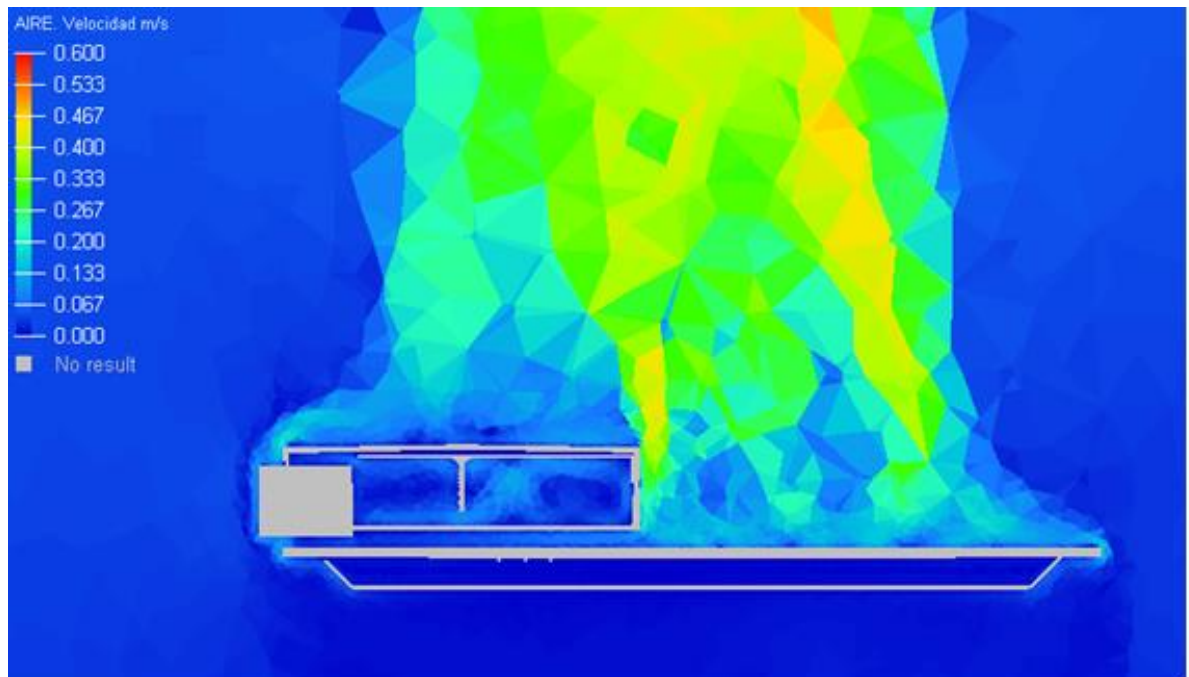


Figura 89. Velocidad Sección Media Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

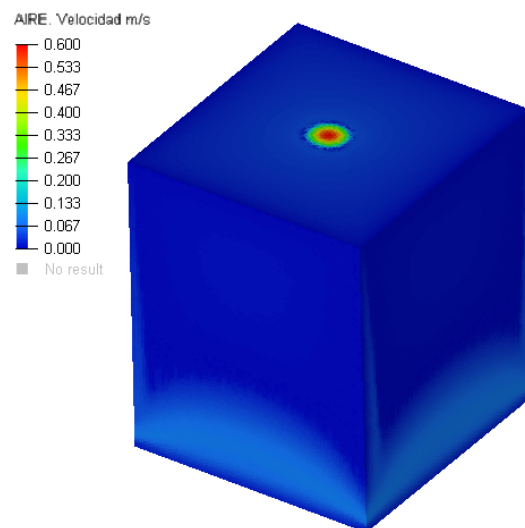


Figura 90. Velocidad Luminaria Modelo A. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.4. Visualización de la temperatura y velocidad en la luminaria Modelo B a 20°C

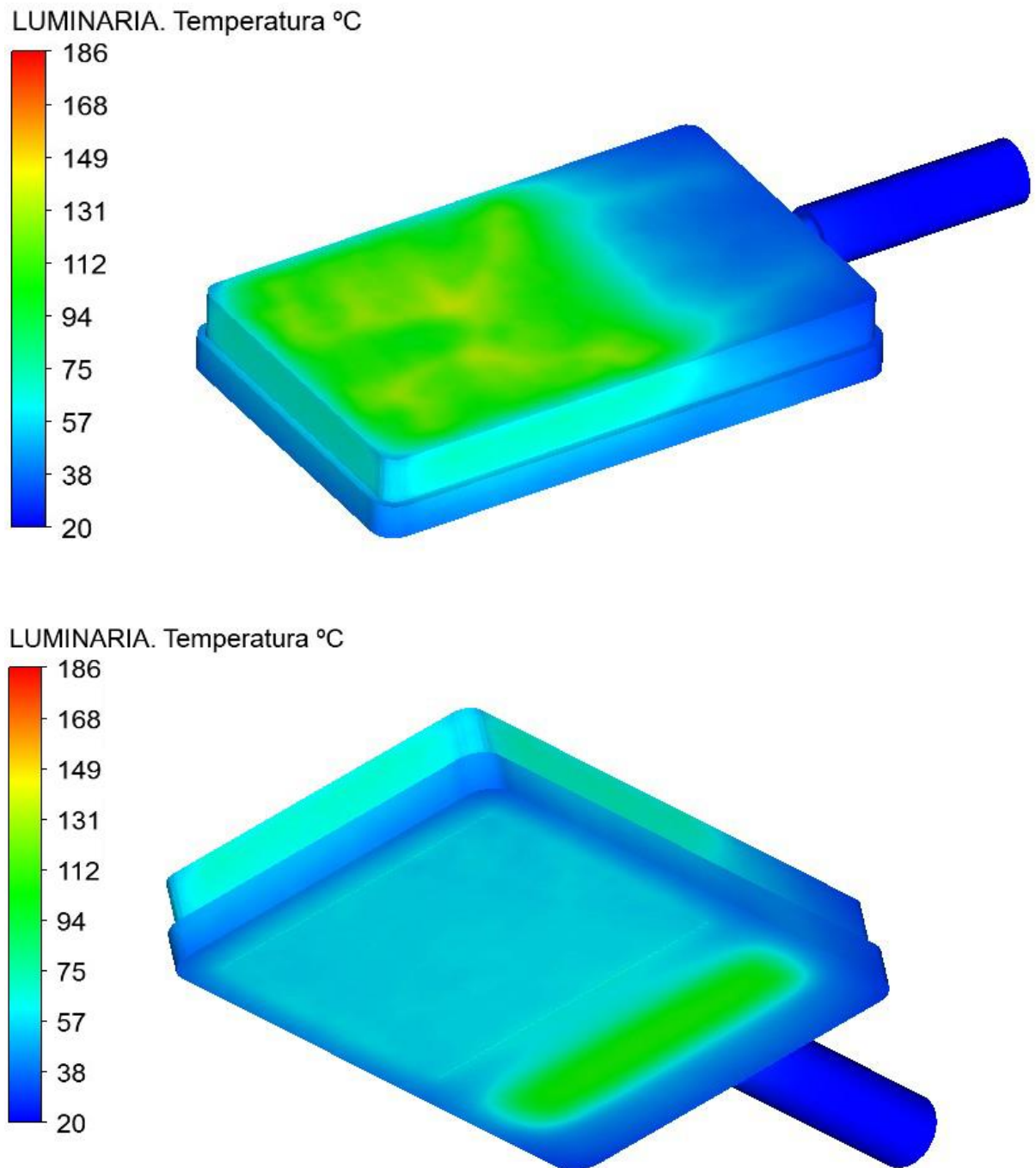


Figura 91. Temperatura general Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

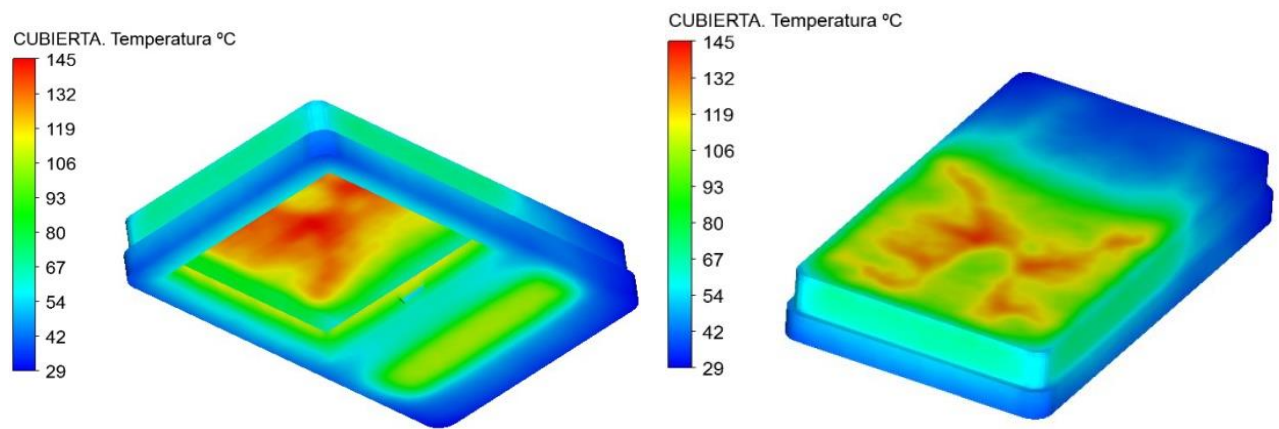


Figura 92. Temperatura Cubierta Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

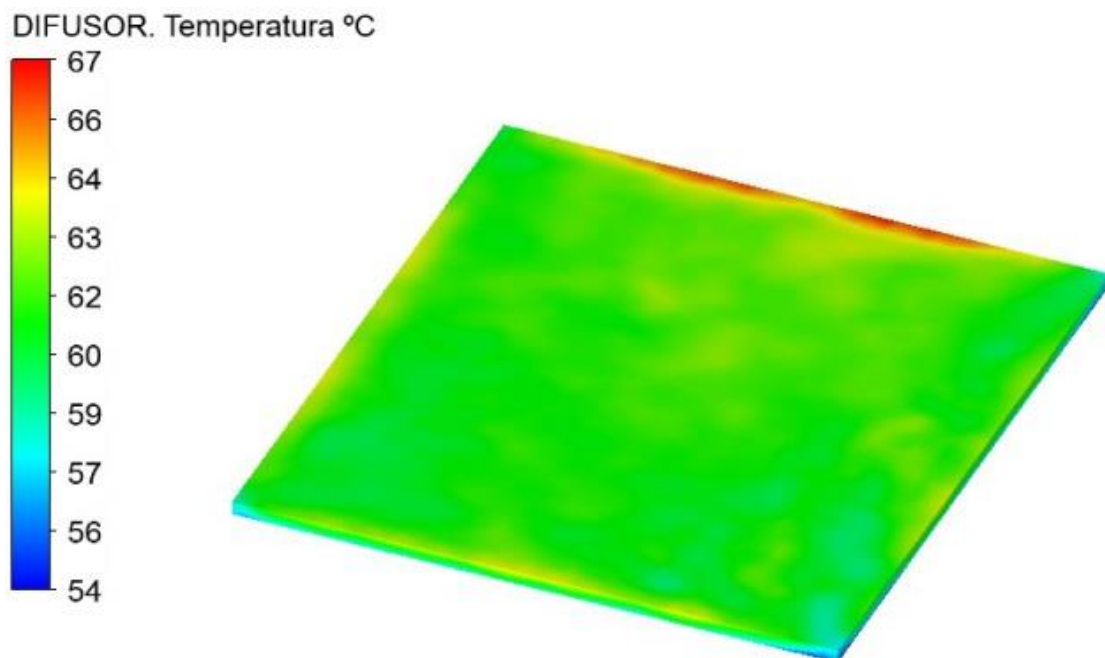


Figura 93. Temperatura Difusor Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

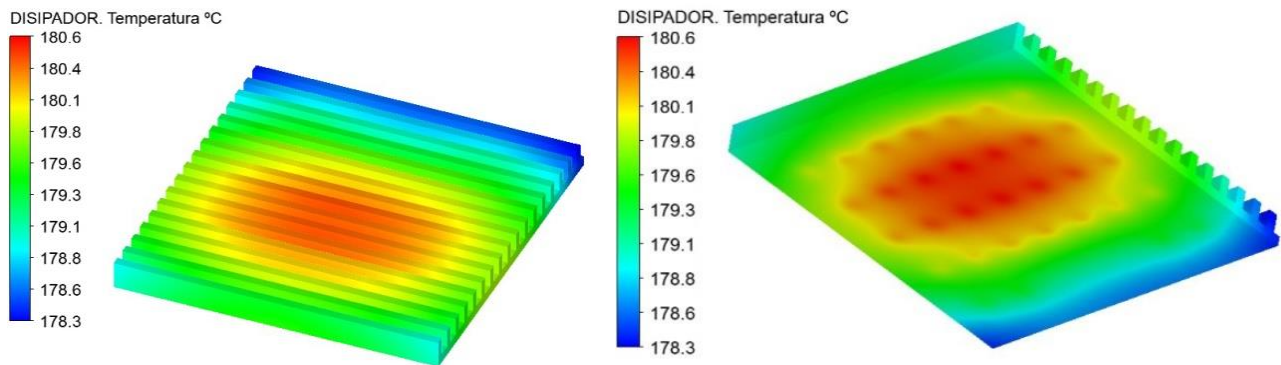


Figura 94. Temperatura Disipador Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

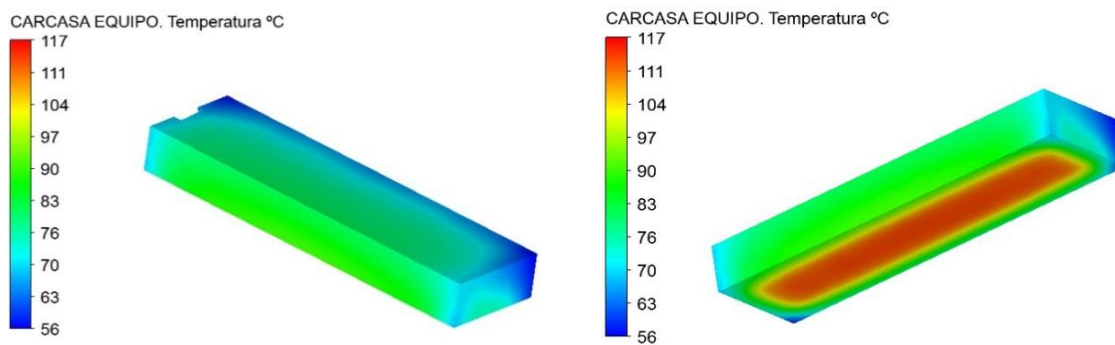


Figura 95. Temperatura Carcasa de equipo Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

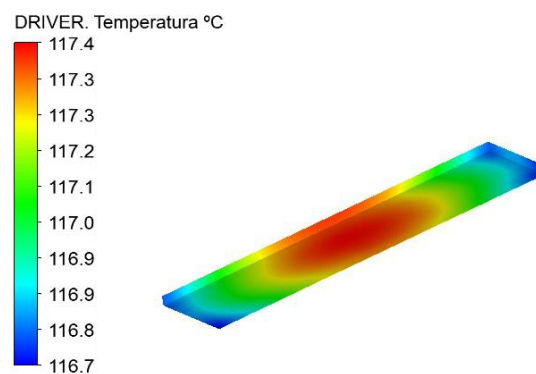


Figura 96. Temperatura Driver Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

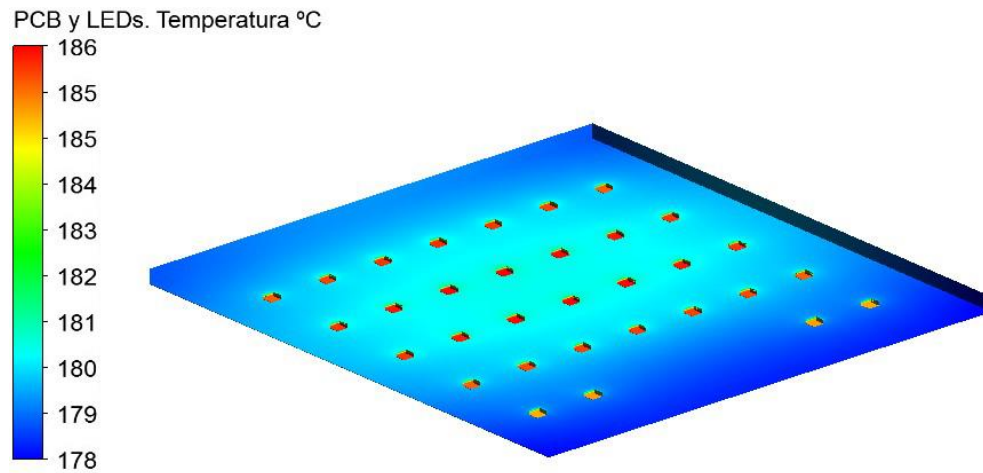


Figura 97. Temperatura PCB Y LED Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

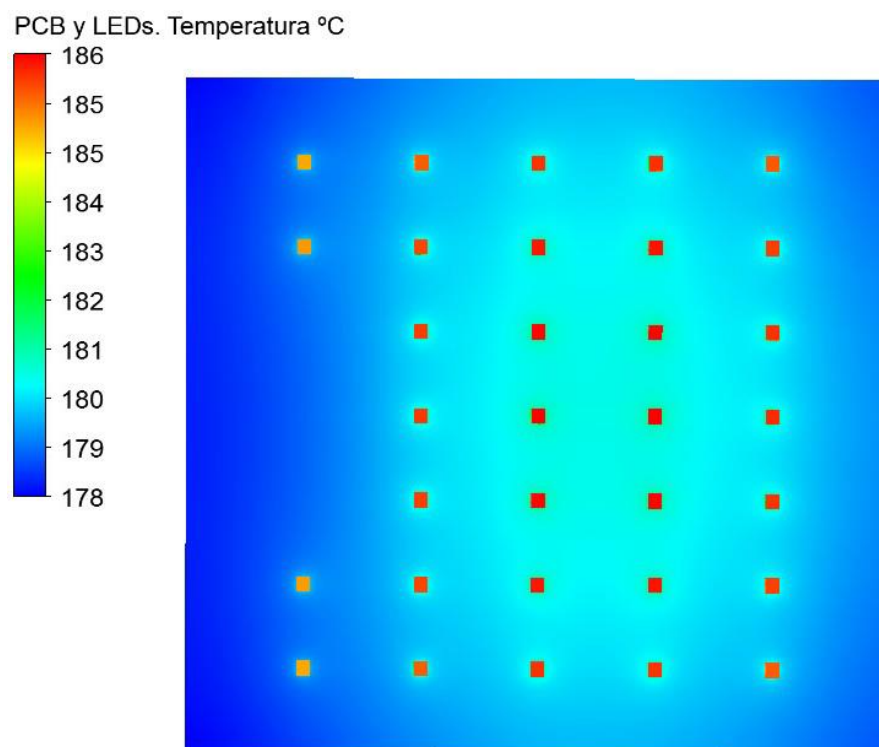


Figura 98. Temperatura PCB Y LED Tj Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

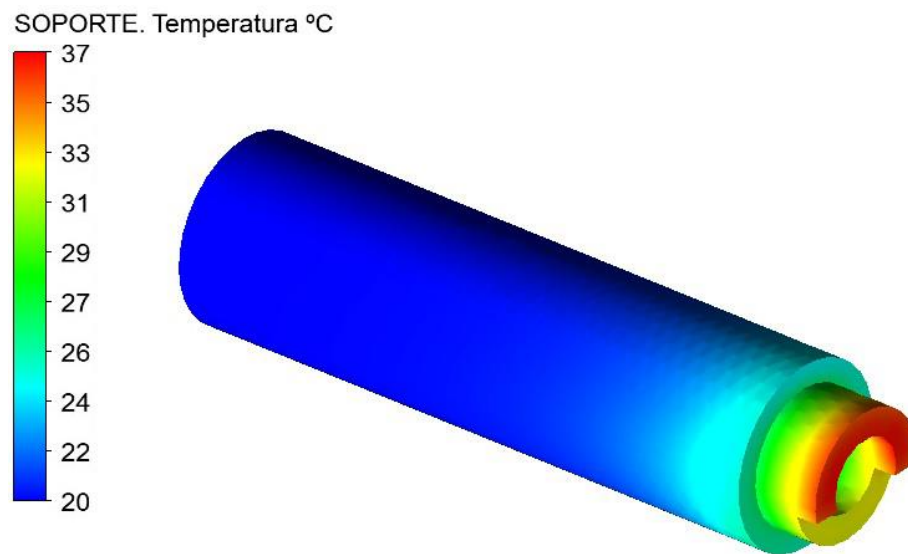


Figura 99. Temperatura Soporte Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

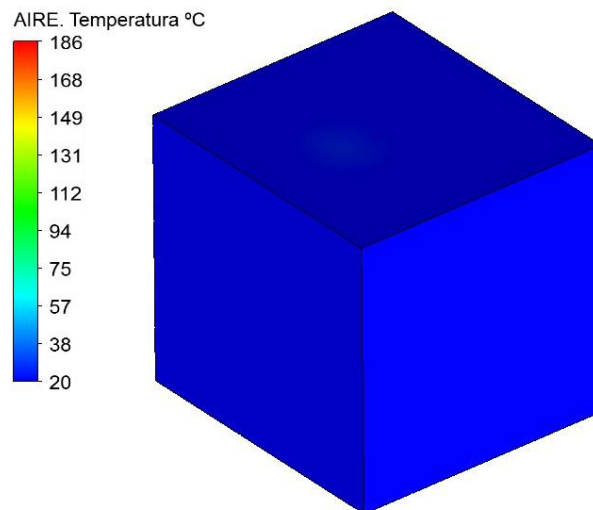


Figura 100. Temperatura Aire Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

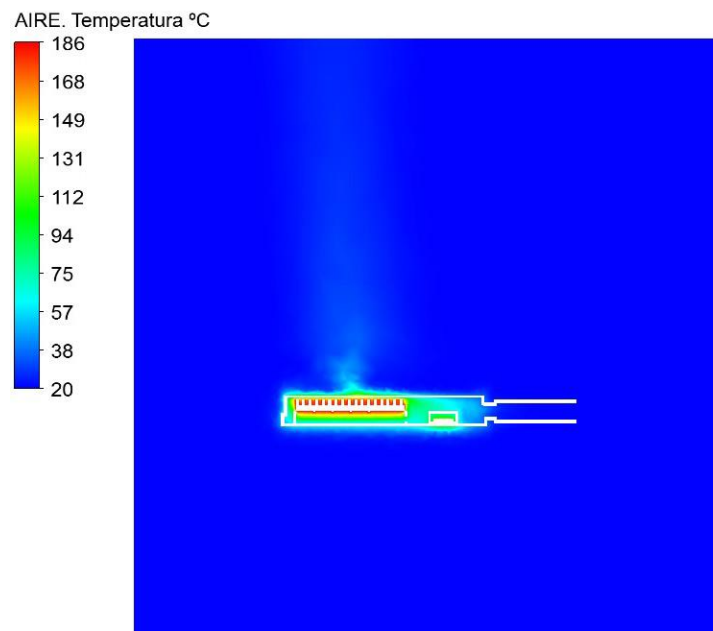


Figura 101. Temperatura Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

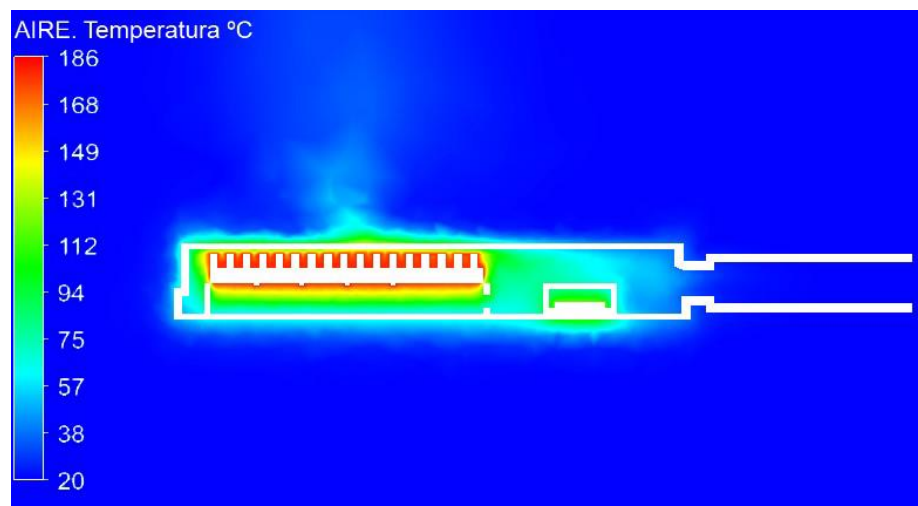


Figura 102. Temperatura Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

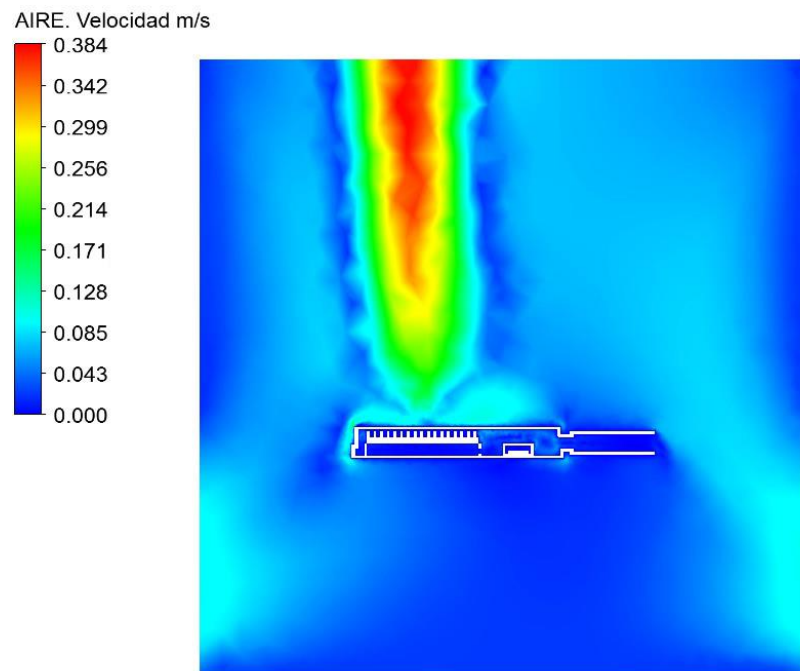


Figura 103. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

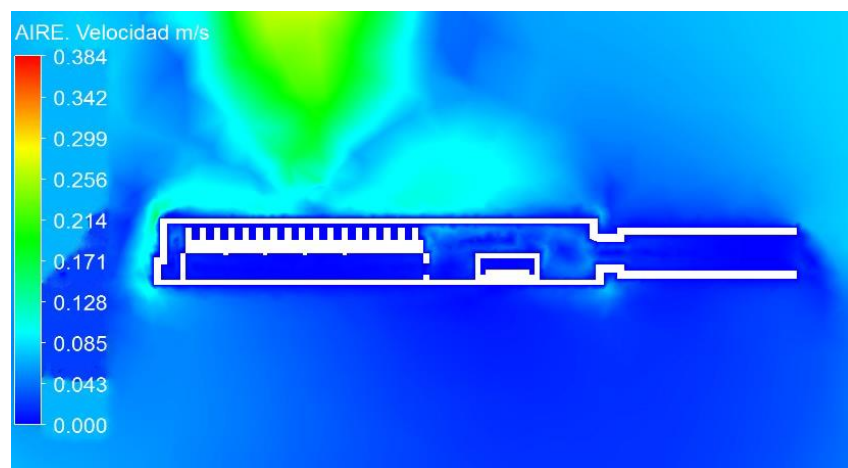


Figura 104. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

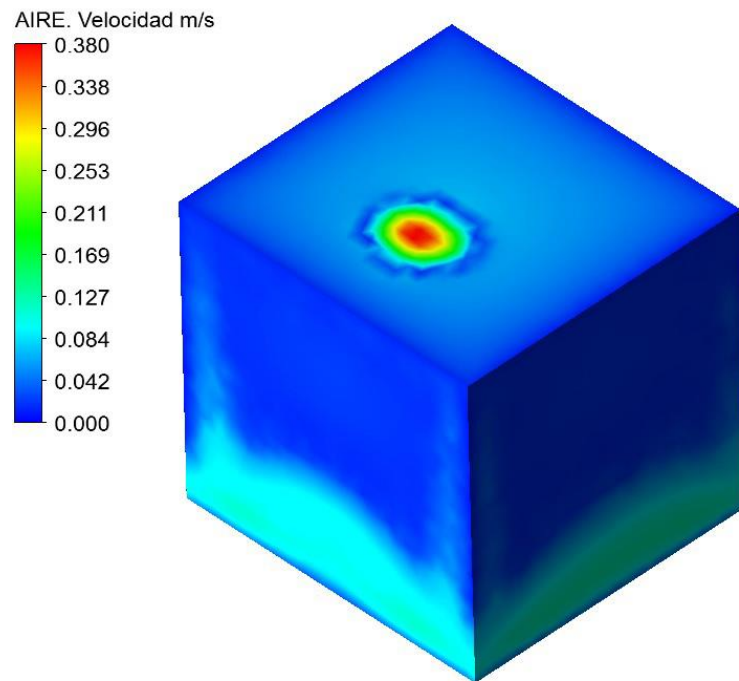


Figura 105. Velocidad Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.5. Visualización de la temperatura y velocidad en la luminaria Modelo B a 40°C

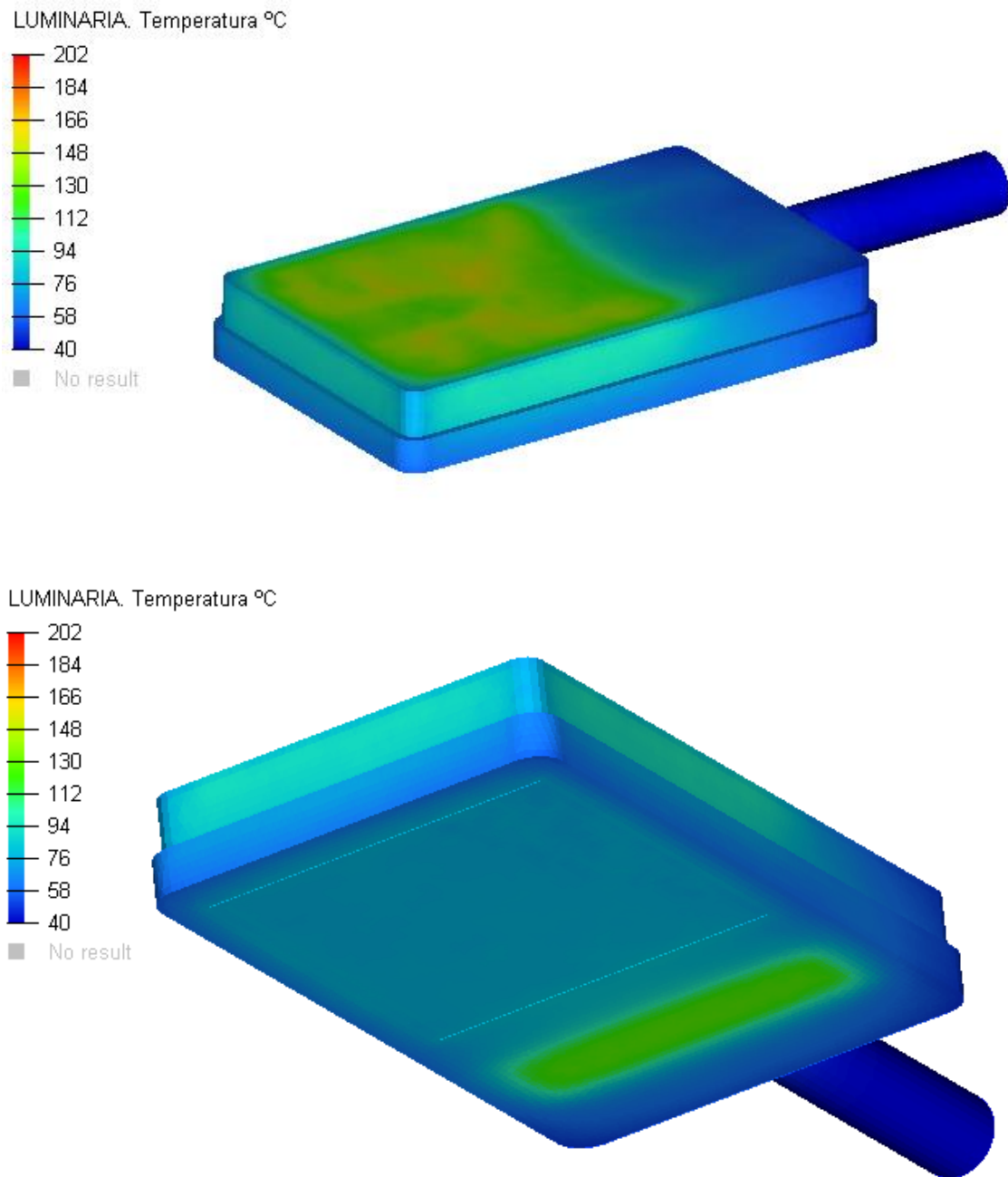


Figura 106. Temperatura general Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

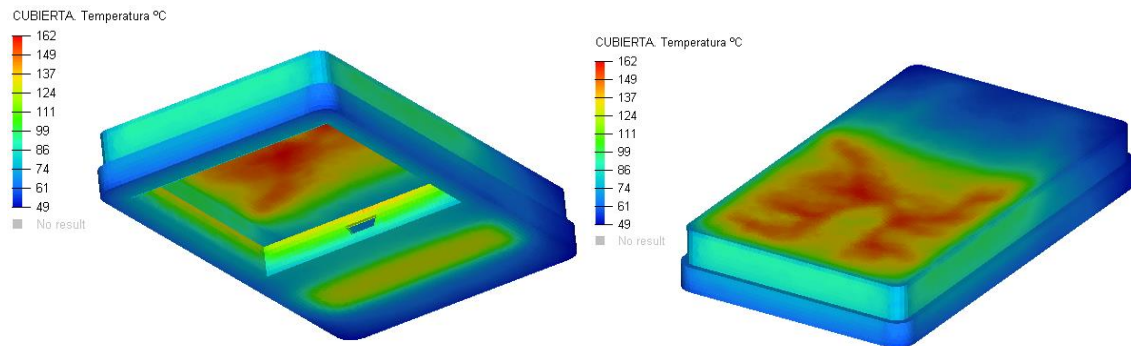


Figura 107. Temperatura Cubierta Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

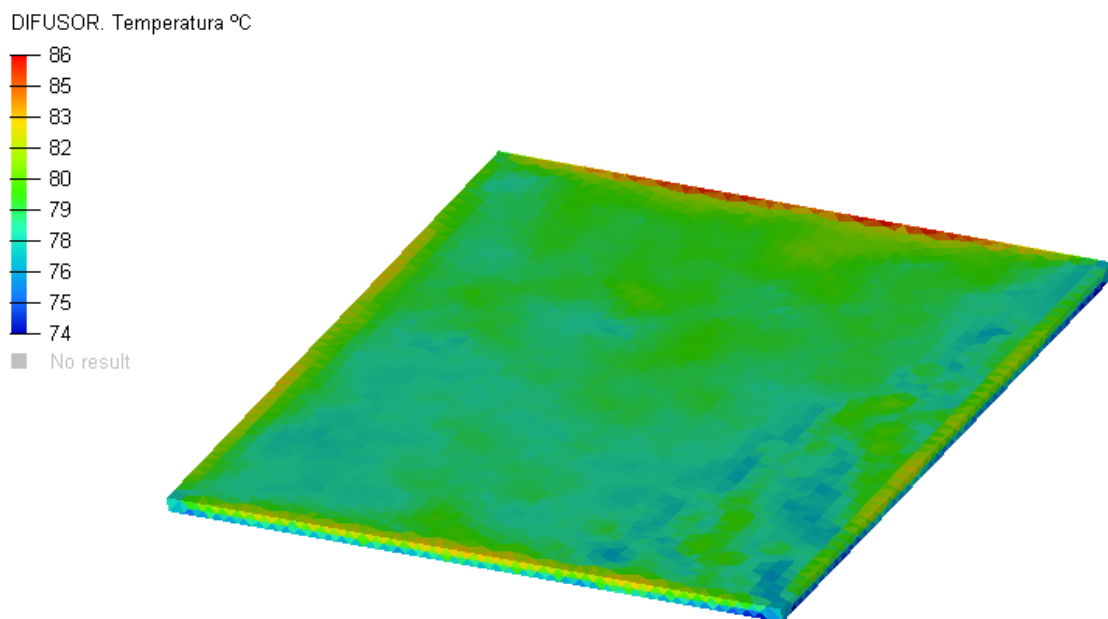


Figura 108. Temperatura Difusor Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

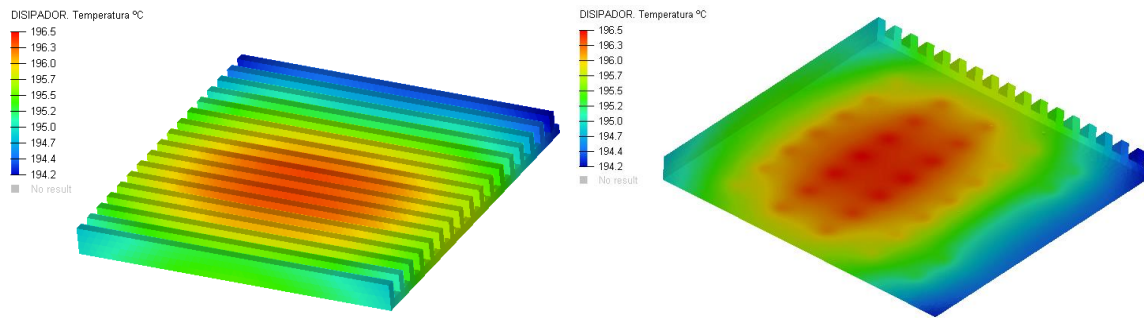


Figura 109. Temperatura Disipador Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

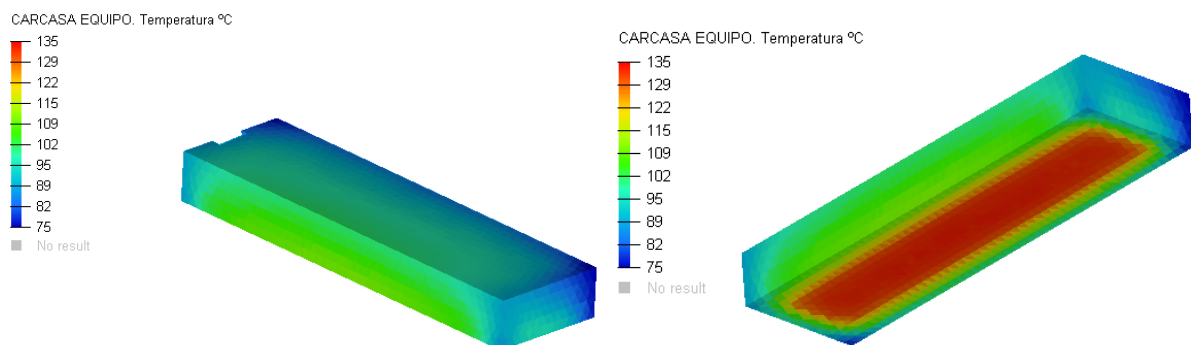


Figura 110. Temperatura Carcasa de equipo Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

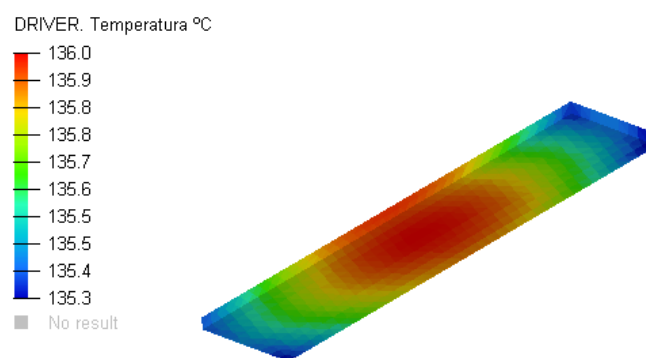


Figura 111. Temperatura Driver Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

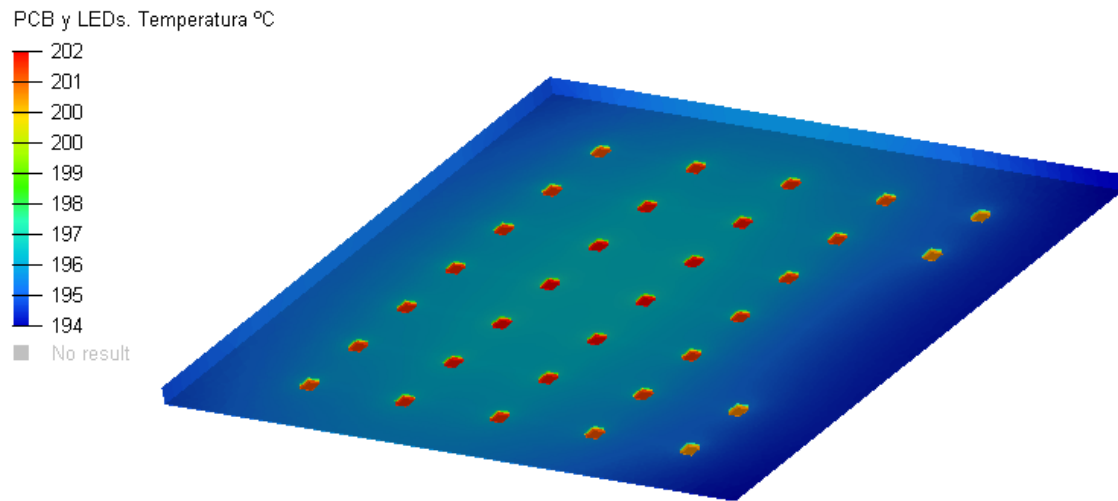


Figura 112. Temperatura PCB Y LED Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

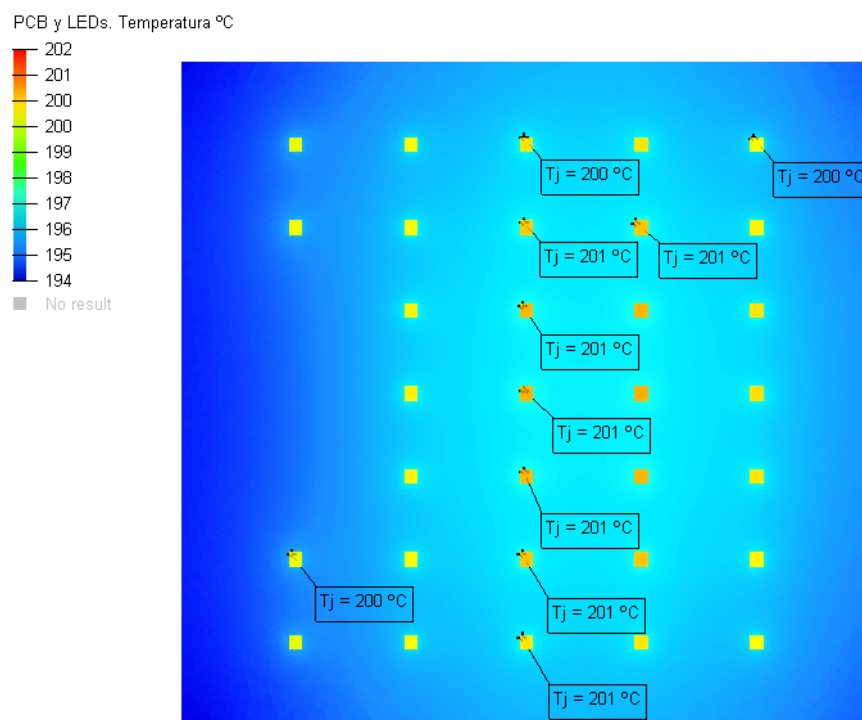


Figura 113. Temperatura PCB Y LED T_j Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

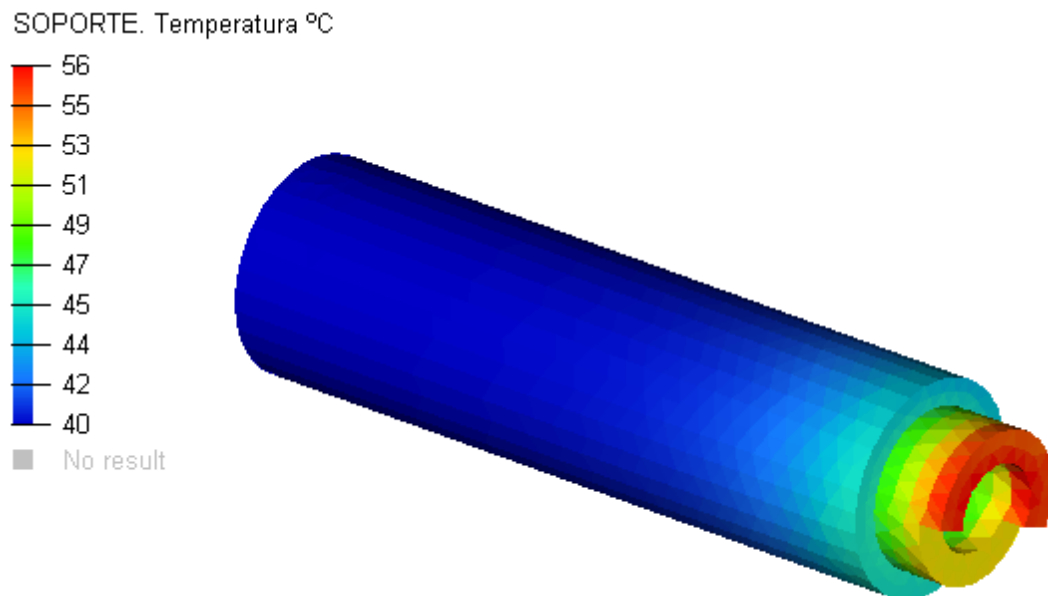


Figura 114. Temperatura Soporte Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

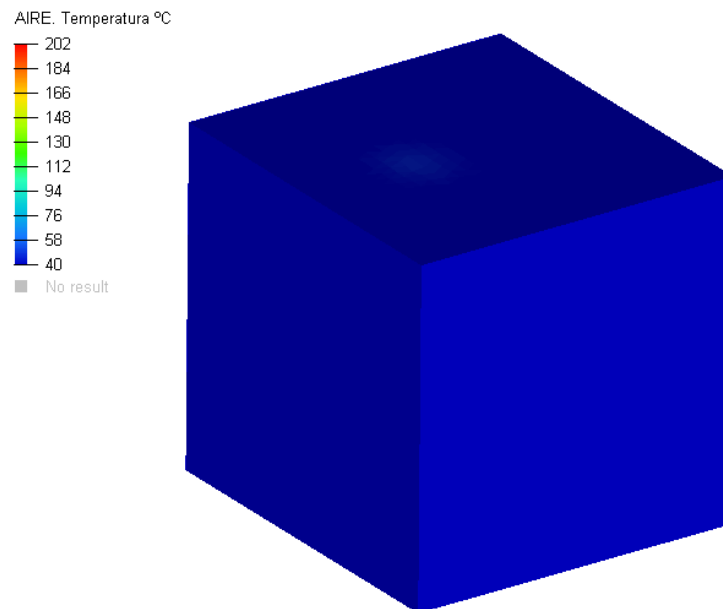


Figura 115. Temperatura Aire Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

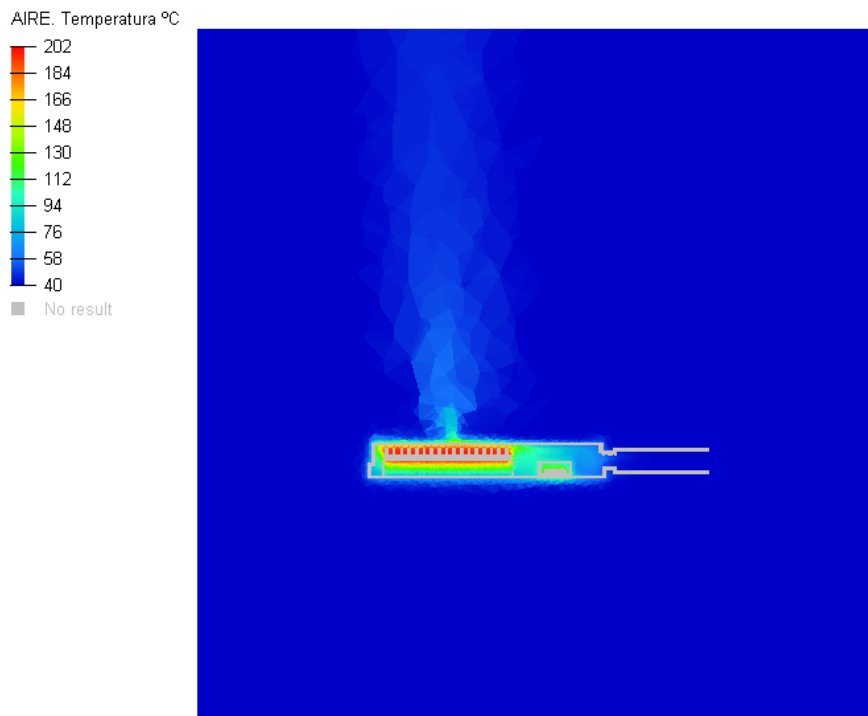


Figura 116. Temperatura Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

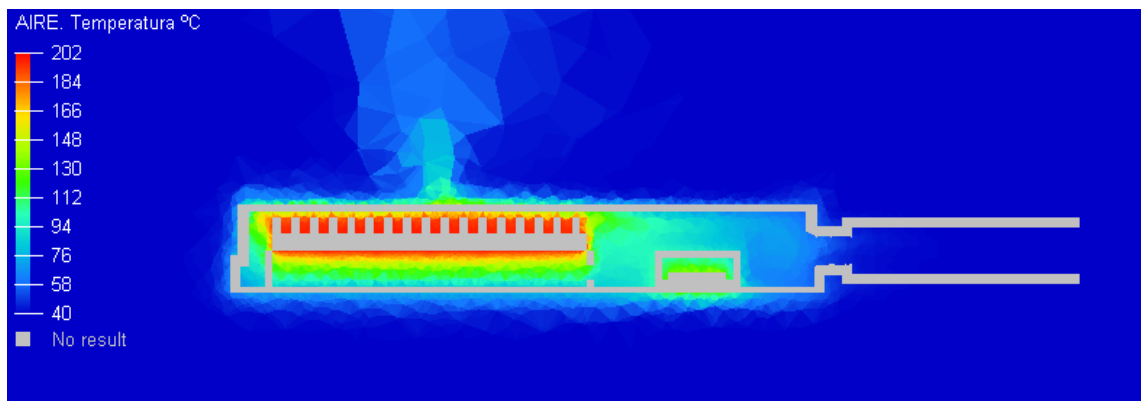


Figura 117. Temperatura Sección Media Aire Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

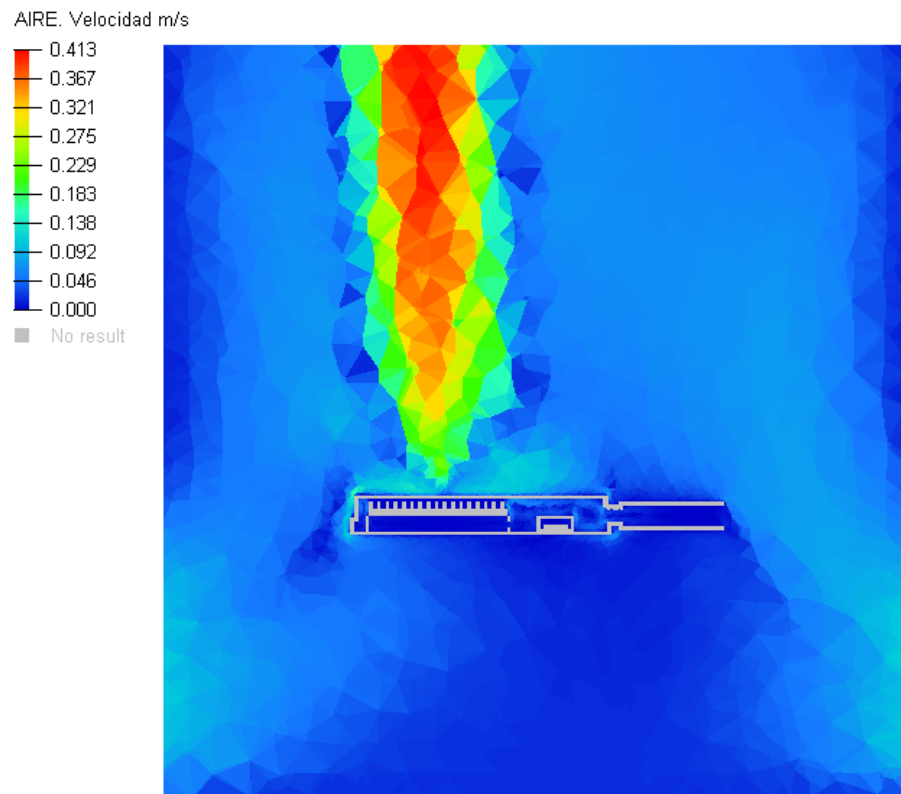


Figura 118. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

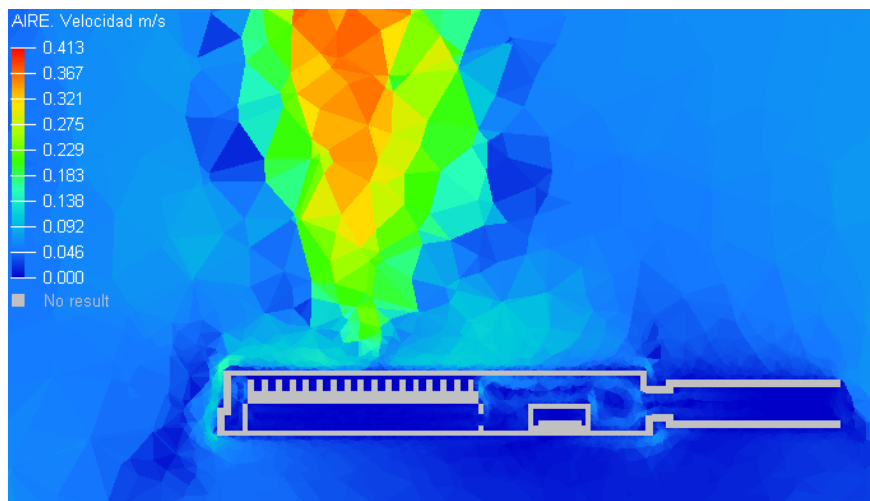


Figura 119. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

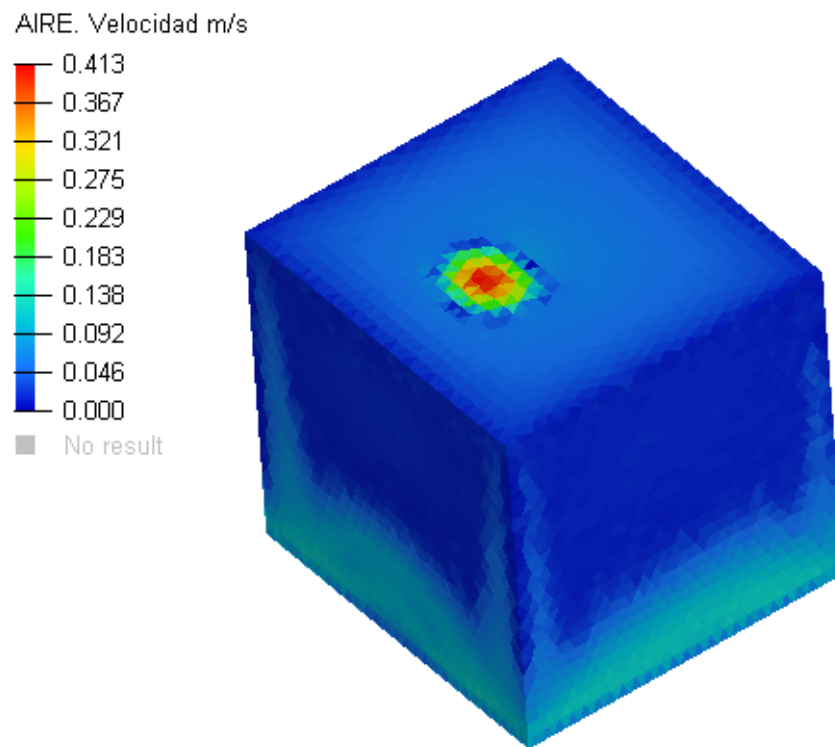


Figura 120. Velocidad Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.6. Visualización de la temperatura y velocidad en la Modelo B a -10°C

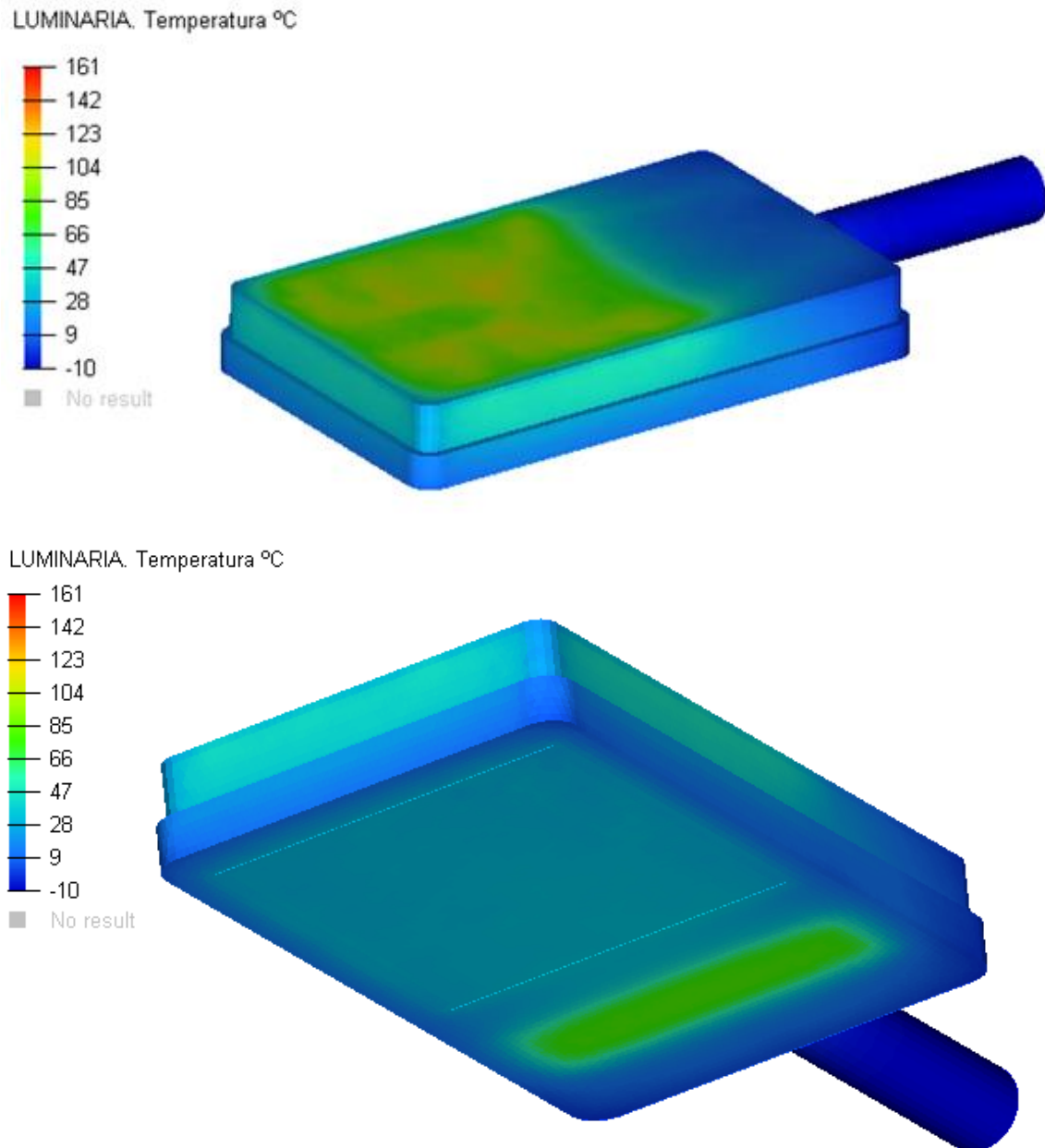


Figura 121. Temperatura general Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

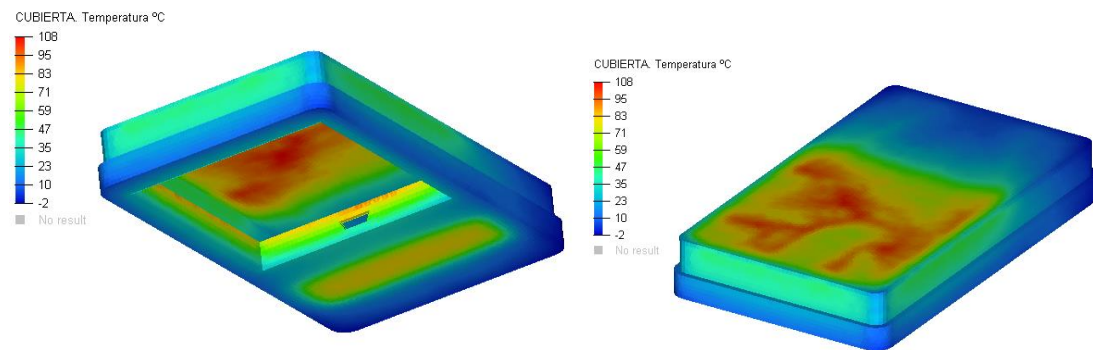


Figura 122. Temperatura Cubierta Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

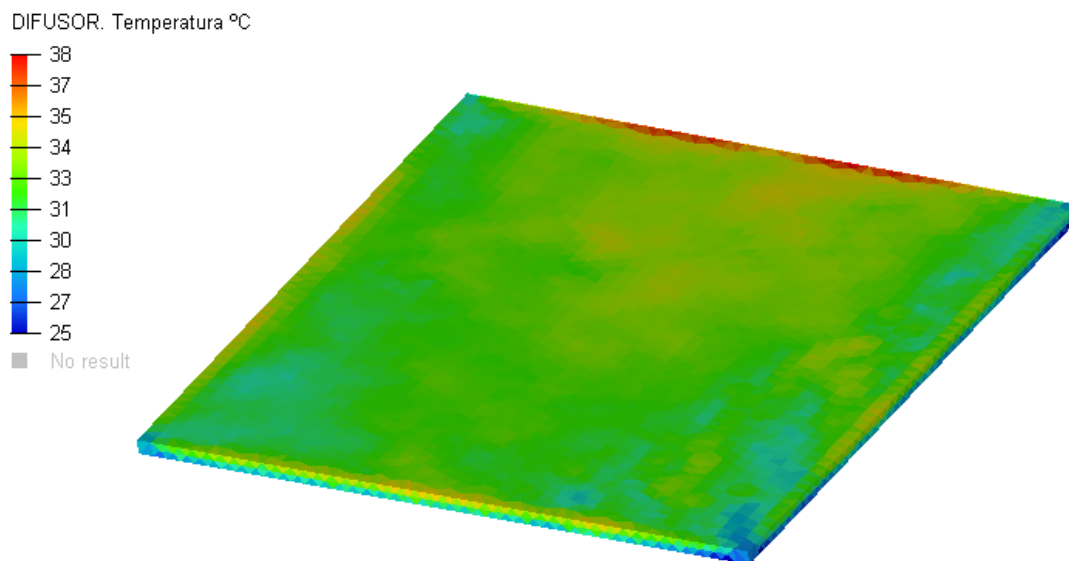


Figura 123. Temperatura Difusor Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

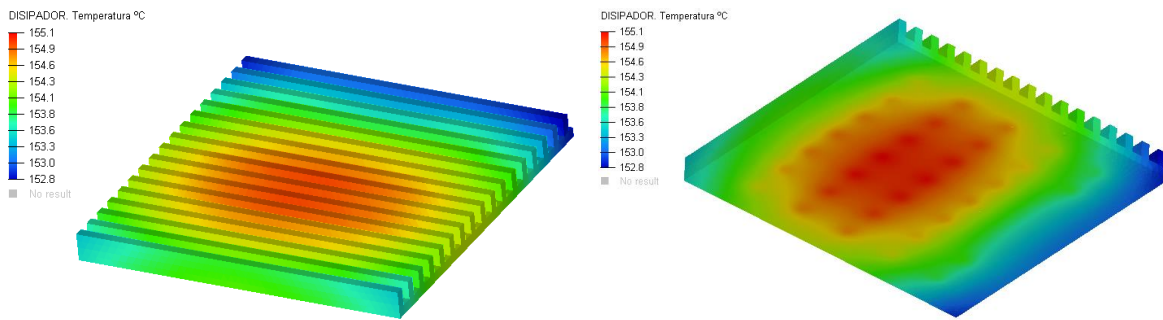


Figura 124. Temperatura Disipador Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

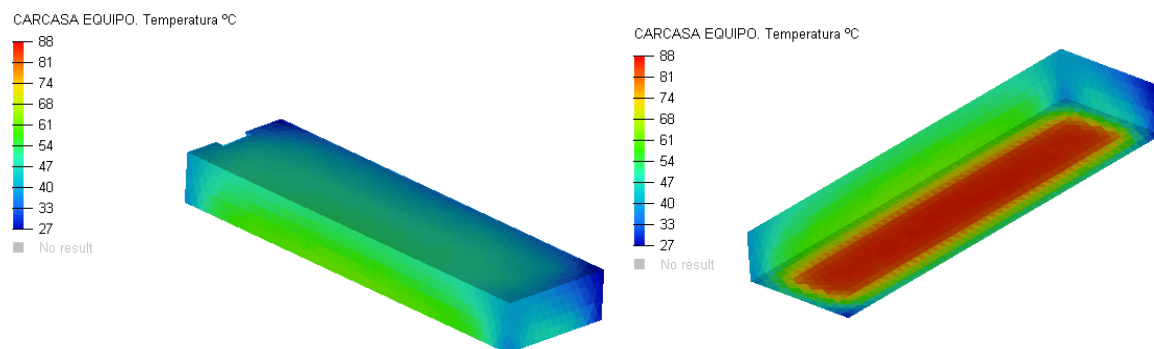


Figura 125. Temperatura Carcasa de equipo Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

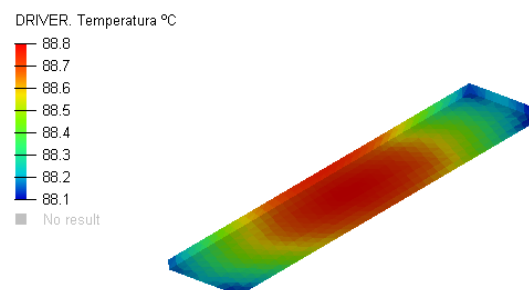


Figura 126. Temperatura Driver Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

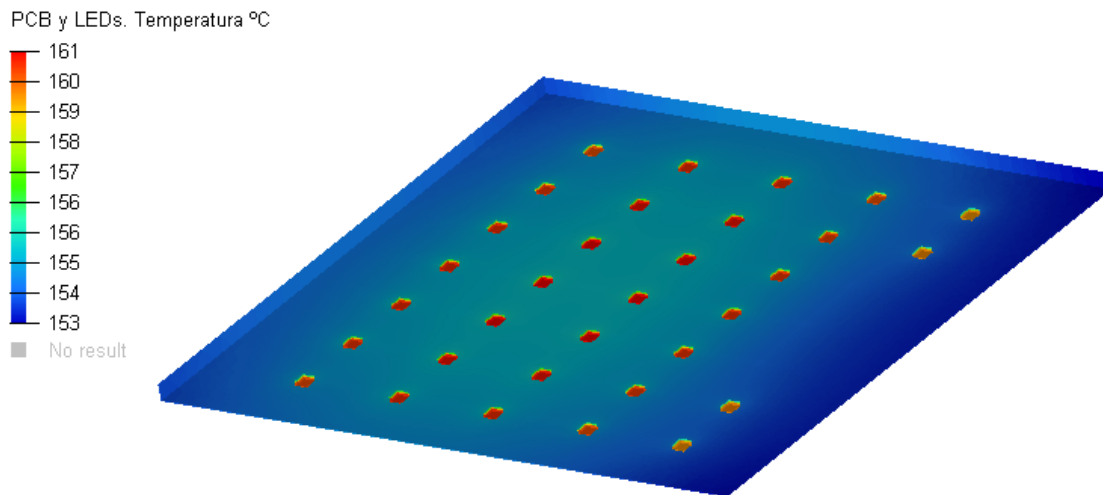


Figura 127. Temperatura PCB Y LED Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

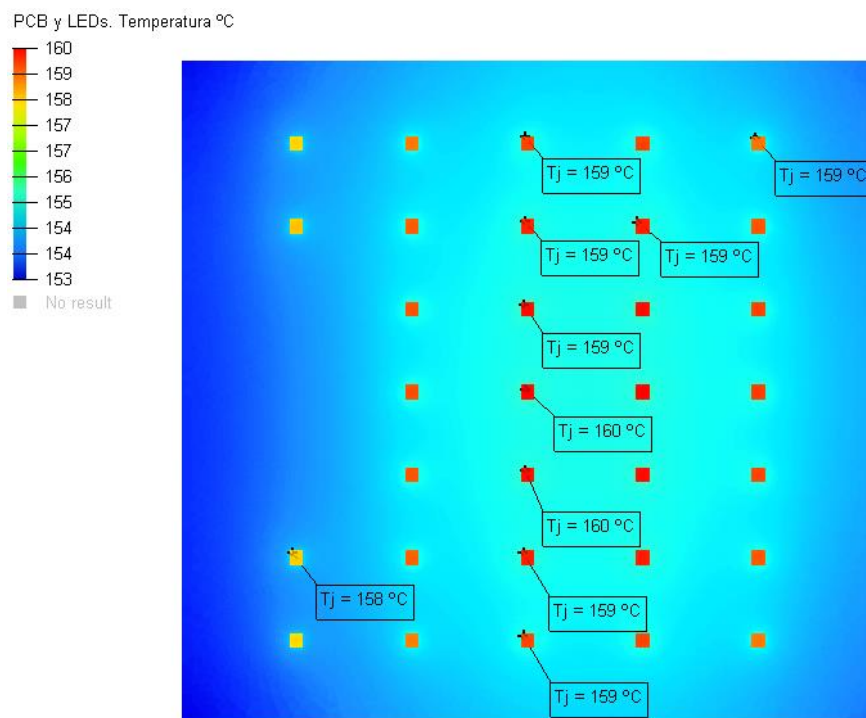


Figura 128. Temperatura PCB Y LED T_J Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

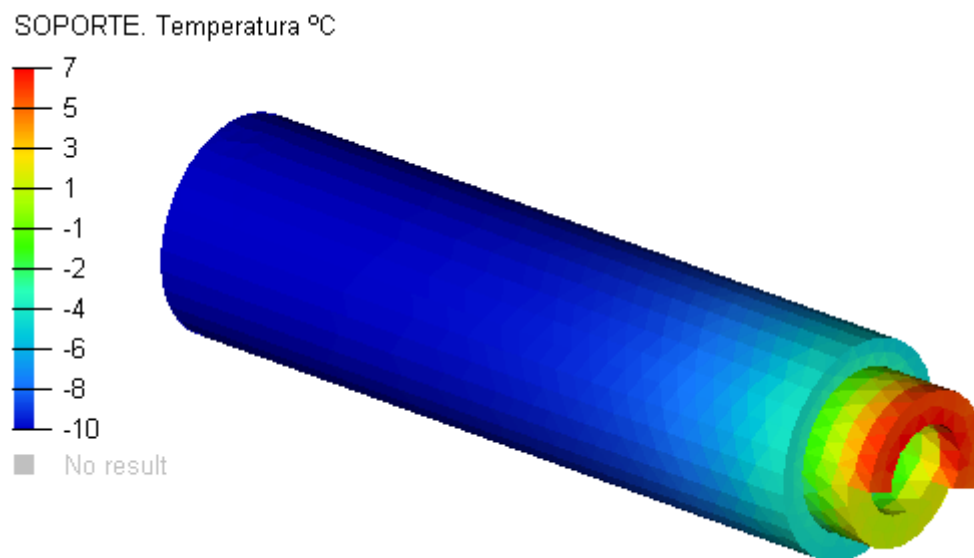


Figura 129. Temperatura Soporte Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

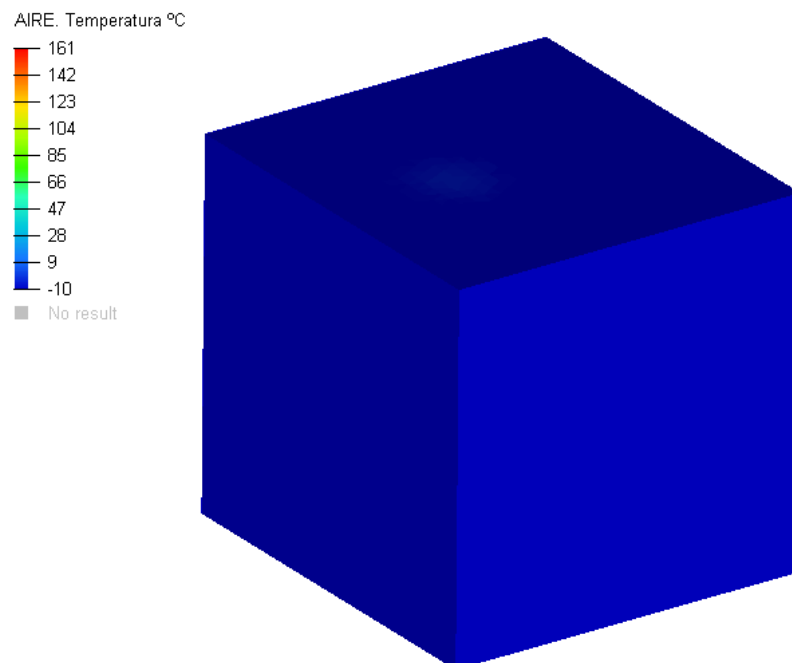


Figura 130. Temperatura Aire Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

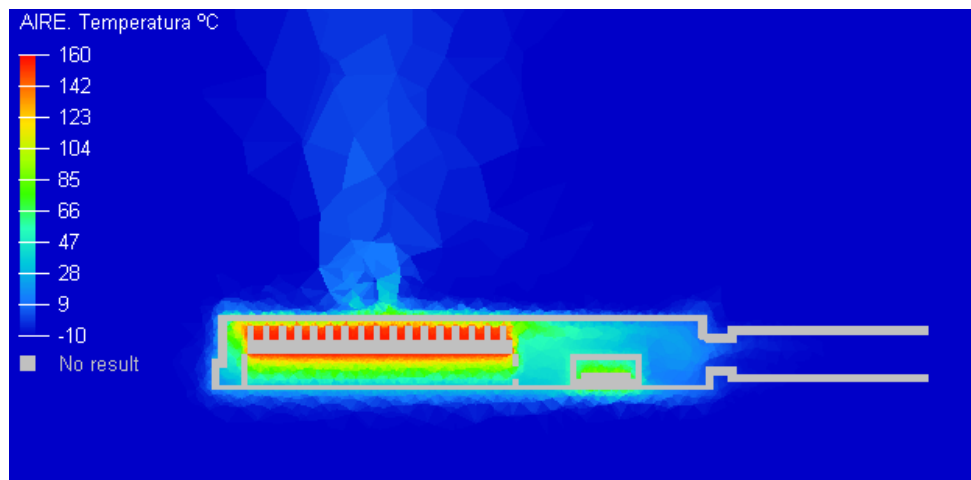


Figura 131. Temperatura Sección Media Aire Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

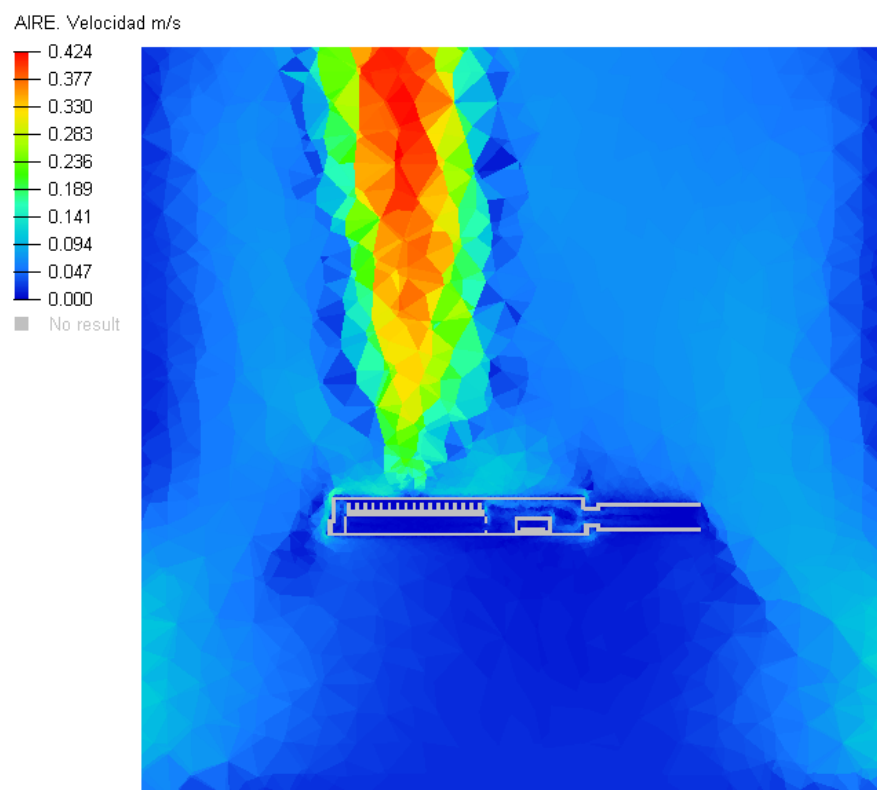


Figura 132. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

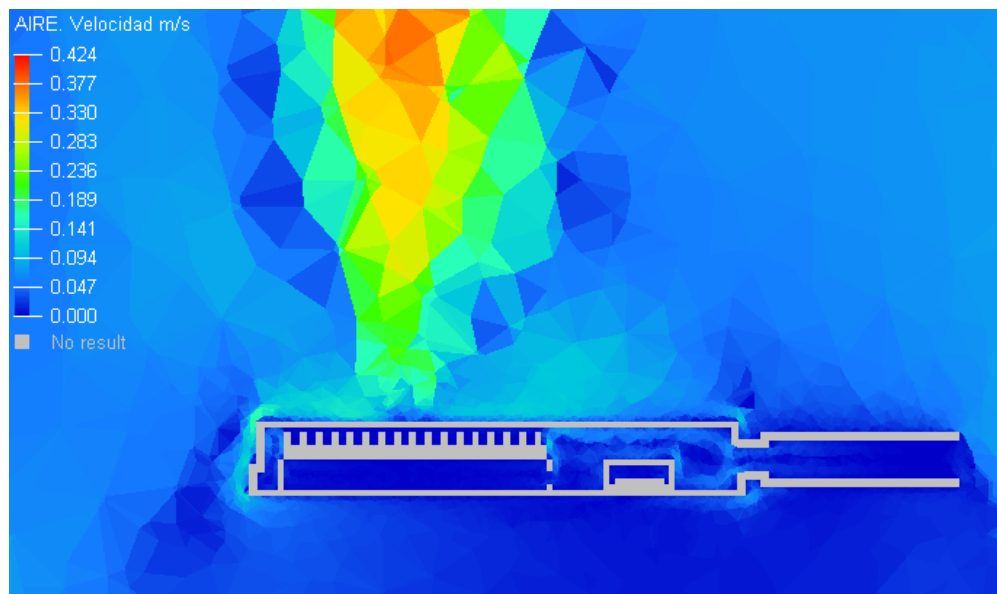


Figura 133. Velocidad Sección Media Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

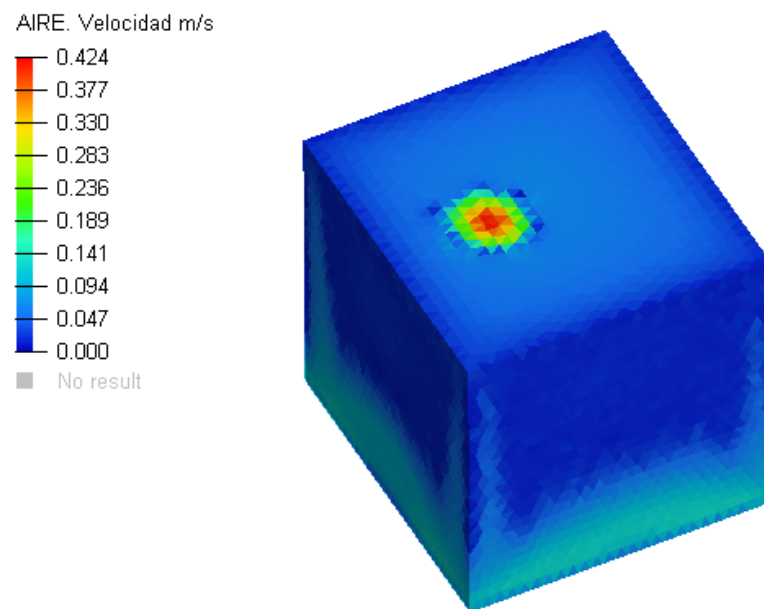


Figura 134. Velocidad Modelo B. Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

2.1.3.7. Resumen de los datos térmicos teóricos de los Modelos A y B

Una vez obtenidos los resultados térmicos teóricos de los modelos A y B, pasamos a comparar los resultados entre ambos modelos y en las diferentes temperaturas ambientes que condicionan las temperaturas alcanzadas de los componentes de los modelos.

En la figura 135 se aprecia el rango de temperaturas que alcanza un modelo respecto la temperatura ambiente de la simulación. Hay que recordar que en el Modelo B la potencia es menor (60W) que el Modelo A (200W).

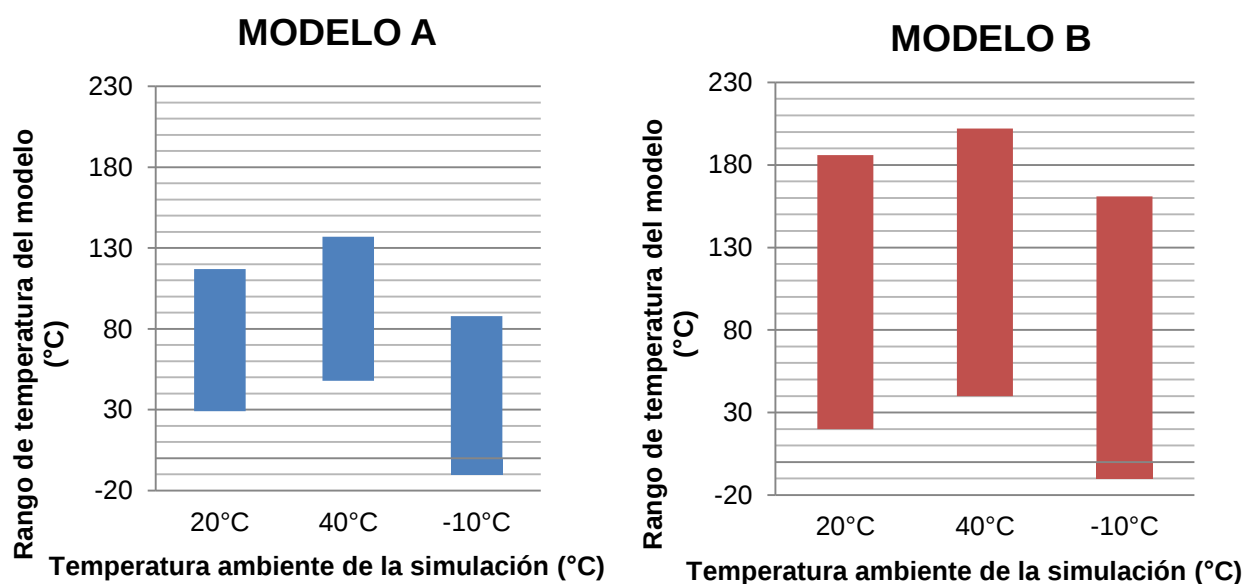


Figura 135. Rango de temperatura de cada modelo respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia

En la figura 136 se representa la temperatura de unión máxima de los LED para ambos modelos frente a distintas temperaturas de contorno en las simulaciones.

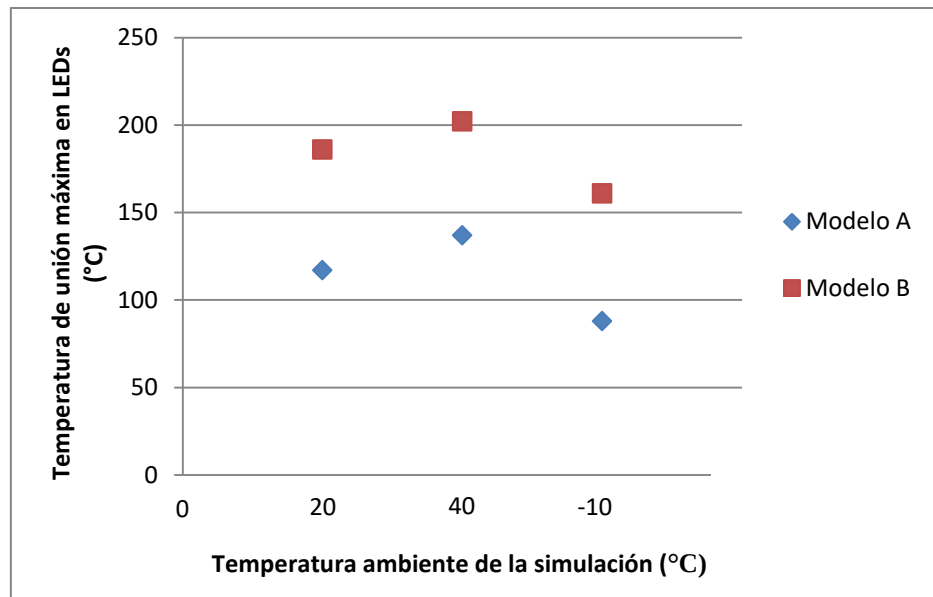


Figura 136. Variación de la temperatura máxima de unión de los LED respecto a la temperatura ambiente de la simulación para ambos modelos. Fuente: elaboración propia

En la figura 137 se puede visualizar las temperaturas de unión de los LED y de los disipadores para ambos modelos y para distintas temperaturas ambientes.

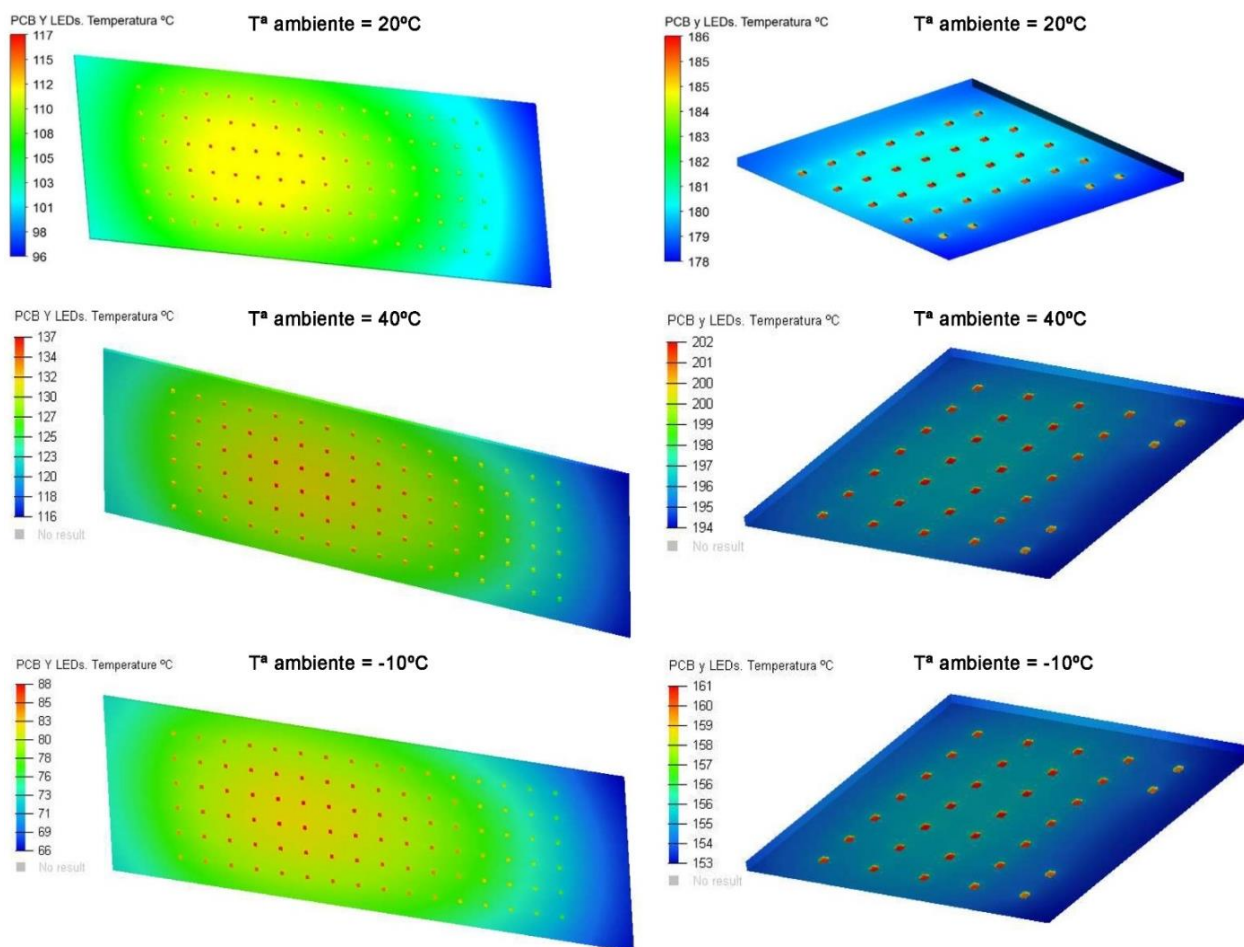


Figura 137. Resumen de las temperaturas de unión de los LED durante la simulación a distintas temperaturas ambientes en el Modelo A (izquierda) y Modelo B (derecha). Fuente: Elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA REAL EN EL LABORATORIO DE LUMINOTECNIA UTILIZANDO UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLUKE TI 25

Para la adquisición de datos reales de las luminarias se utilizará una cámara termográfica en el laboratorio de luminotecnica de la Universidad de Jaén. Las cámaras termográficas son dispositivos que convierten la energía térmica (calor) en luz visible para analizar un objeto o escena en particular. La imagen producida se conoce como termograma y se analiza a través de un proceso llamado termografía.

Las cámaras termográficas son dispositivos sofisticados que procesan la imagen capturada y la muestran en una pantalla. Estas imágenes se pueden usar para un diagnóstico inmediato o procesarse a través de un software especializado para una mayor evaluación, precisión y rendimiento del informe. Las cámaras termográficas llevan la temperatura de medición al siguiente nivel; en lugar de obtener un número para la temperatura, obtienes una imagen que muestra las diferencias de temperatura de una superficie [37]. En la figura 138 se muestra el diagrama de flujos para la adquisición de datos experimentales de 5 luminarias LED para su posterior estudio [22] y comparativa con los datos térmicos teóricos [18].

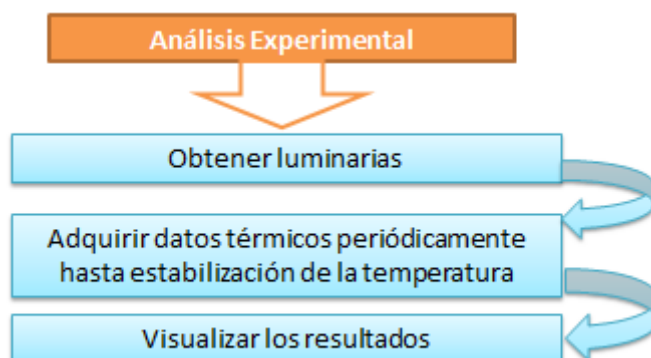


Figura 138. Diagrama de flujos de la metodología a seguir para la obtención de los resultados teóricos en el análisis térmico de las 5 luminarias LED bajo estudio. Fuente: elaboración propia

3.1. Características de la cámara termográfica utilizada

La cámara termográfica utilizada es una FLUKE Ti 25, esta cámara está fabricada para ser utilizada en entornos de trabajo muy adversos. Se captura una imagen digital con una infrarroja y la fusiona. El rango de temperatura es de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una presión de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La sensibilidad térmica es de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una temperatura ambiental de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto describe la menor diferencia entre dos píxeles en temperatura que la cámara puede medir [37]. En la tabla 4 quedan recogidas las especificaciones de la cámara termográfica utilizada para el estudio.

Atributo	Valor
Sensibilidad Termal	$\leq 90\text{mK}$
Rango de Medición de Temperatura	$-20 \rightarrow +350\text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión Máxima de Medición de Temperatura	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Campo de visión H x V	$23 \times 17^{\circ}$
Frecuencia de Actualización	9Hz
Distancia Mínima de Enfoque	15 (Thermal Lens) cm, 46 (Visual Lens) cm
Tipo de Enfoque	Manual
Resolución del Detector	$160 \times 120\text{píxel}$
Tamaño del Display	3.7plg
Resolución de Display	$640 \times 480\text{píxel}$
Peso	1.2kg
Altura	267mm
Anchura	127mm
Número de modelo	Ti25
Longitud	152mm

Tabla 4. Tabla de especificaciones de la cámara termográfica. Fuente: Manual de uso. Cámara termográfica Ti 25 FLUKE



Figura 139. Cámara termográfica Fluke Ti 25. Fuente: Manual de uso. Cámara termoFiguraTi25 FLUKE

Para el estudio de las imágenes tomadas con la cámara termográfica se utiliza el software SmartView que se suministra con la cámara. Este software contiene funciones para poder analizar las imágenes y organizar los datos almacenados [37].

3.2. Emisividad

Todos los objetos irradian energía infrarroja. La cantidad de energía irradiada se basa en dos factores principales: la temperatura de la superficie del objeto y la emisividad de dicha superficie [37]. La mayoría de los objetos medidos tales como metal pintado, madera, agua, piel y tela son muy eficientes para irradiar energía y es muy fácil obtener mediciones exactas. Para superficies que son eficientes para irradiar energía (alta emisividad), el factor de emisividad se estima en un 95% (o 0.95) [38]. La emisividad varía de 0 a 1, para un cuerpo negro que irradia la máxima energía infrarroja su valor es 1. Sin embargo, esta simplificación no funciona para superficies brillantes o metálicas sin pintar, es necesaria una corrección de la emisividad [39].

La emisividad es un tema muy importante para la medida de temperatura de superficies sin estar en contacto [38]. Dependiendo del material que se va a medir la

superficie la emisividad variará [39]. La emisividad determinada para obtener las temperaturas de los materiales se ha obtenida de una tabla de emisividades [40].

3.3. Luminarias bajo estudio experimental

Las luminarias elegidas para la adquisición de datos con la cámara termográfica en el laboratorio de luminotecnia se deben a la disponibilidad que tienen los fabricantes para prestar las luminarias y las luminarias que se encuentran en el laboratorio de luminotecnia de la Universidad de Jaén. En particular hay dos luminarias que están instaladas actualmente repartidas por toda la ciudad de Jáen. (Figuras 139 y 140)

La primera luminaria bajo estudio es la luminaria Aire Serie 7 de ATP, ver figura 140. Esta luminaria se corresponde con un novedoso diseño para la mejora de la disipación térmica y corresponde con el Modelo A, el cual se ha realizado la simulación térmica para la previsión de la disipación de calor y el flujo de aire [27].



Figura 140. Luminaria LED Aire Serie 7 de ATP Lighting. Fuente: ATP Iluminación catálogo LED Febrero 2018

Otra luminaria disponible es el modelo NaviaP de Sólydi Led Innovation, figura 141, que corresponde con un diseño en el que el disipador de calor está en

contacto con el ambiente, con una potencia nominal total de 60W, 32 LED con una potencia de 1.67W/LED, el material del disipador es de aluminio [28].



Figura 141. Luminaria LED NaviaP de Sólydi LED Innovation. Fuente: Sólydi Catálogo

La siguiente luminaria corresponde con la LH – GL1A fabricada por Luminhome Lighting figura 142, con una potencia nominal de 60W, que cuenta con 18 LED con 2W/LED, los materiales del cuerpo y carcasa son de una aleación de aluminio [41].



Figura 142. Luminaria LH – GL1A de Luminhome Lighting. Fuente: Hoja de características Luminaria LH – GL1A de Luminhome Lighting

Otra luminaria a la que se le tomarán los datos experimentales para el estudio es la luminaria T1A – 2 – 80 de Luminhome Lighting, figura 143. La potencia

nominal de la luminaria es de 80W, con 2 módulos de 14 LED, con 2.3 W/LED. El cuerpo y la carcasa están formadas por una aleación de aluminio [42].



Figura 143. Luminaria T1A – 2 – 80 de Luminhome Lighting. Fuente: Hoja de características Luminaria T1A – 2 – 80 de Luminhome Lighting

Y la última luminaria presente en este estudio corresponde con una luminaria de Philips con una potencia nominal de 20W, figura 144. Está formada por 16 LED de una potencia de 1 W/LED, el cuerpo y la carcasa están integrados por una aleación de aluminio.



Figura 144. Luminaria Philips 20W. Fuente: elaboración propia

En la siguiente tabla 5 quedan recogidas las principales características pertenecientes a las 5 luminarias del presente estudio.

	Potencia Nominal (W)	Número LED	Potencia por LED (W/LED)	Potencia DRIVER (W)
ATP Aire Serie 7	204	96	2	12
Sóldidy NaviaP	60	32	1,67	7
LH – GL1A	60	18	2,7	10
T1A – 2 – 80	80	28	2,3	15
Philips 20W	20	16	1	4

Tabla 5. Tabla resumen de las características principales de cada luminaria.

Fuente: elaboración propia

3.4. Datos adquiridos con la cámara termográfica

Se ha realizado una toma de datos progresiva desde el encendido hasta la estabilización térmica de los equipos. Tomando datos de manera periódica hasta que la temperatura se ha mantenido estable. Las imágenes de la cámara termográfica representan temperatura en régimen estacionario, una vez estabilizada su temperatura, pasado un tiempo desde su conexión a la red eléctrica.

3.4.1. Datos termográficos Aire Serie 7

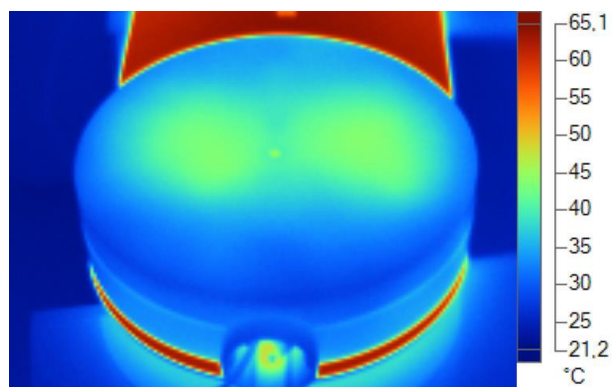


Figura 145. Datos térmicos de la cubierta. Zona azul y verde. Emisividad plástico 0,92. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1

Fluke

A la hora de realizar las medidas del disipador con la cámara termográfica y al ser un material específico con una determinada aleación o formulación en el compuesto del material, se han utilizado varios tipos de emisividades para la obtención de la temperatura exacta.

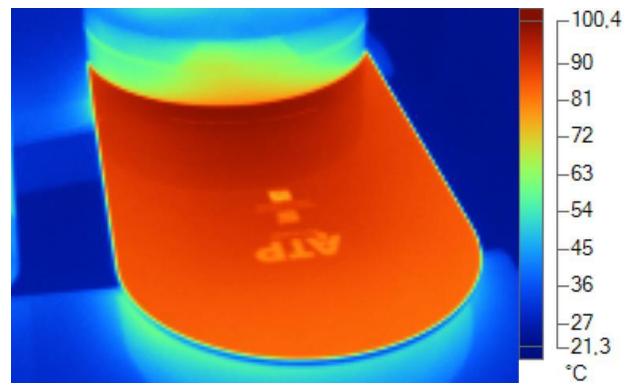


Figura 146. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza. Emisividad Aleación Aluminio 0.5. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

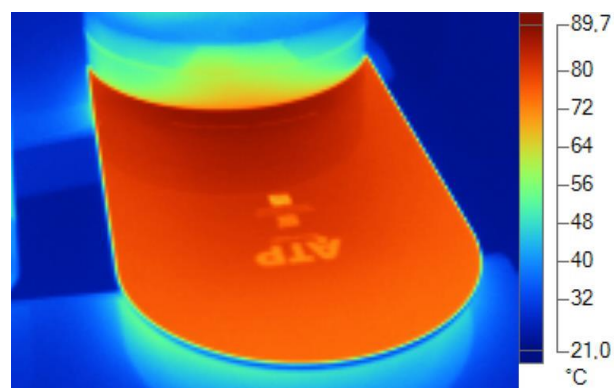


Figura 147. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza. Emisividad Aleación Aluminio 0.6. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

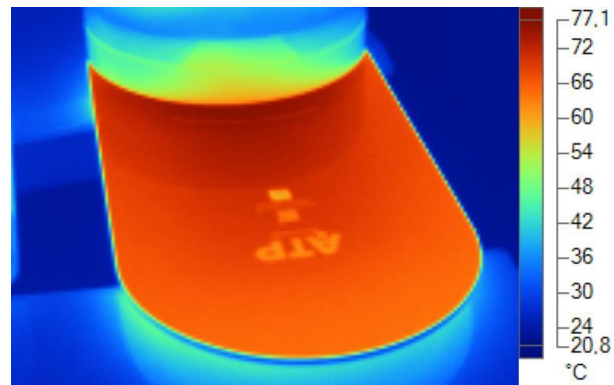


Figura 148. Datos térmicos del disipador Zona rojiza. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

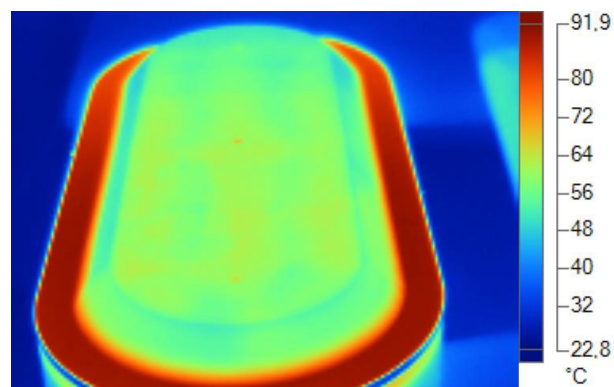


Figura 149. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza Emisividad Aleación Aluminio 0.5. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

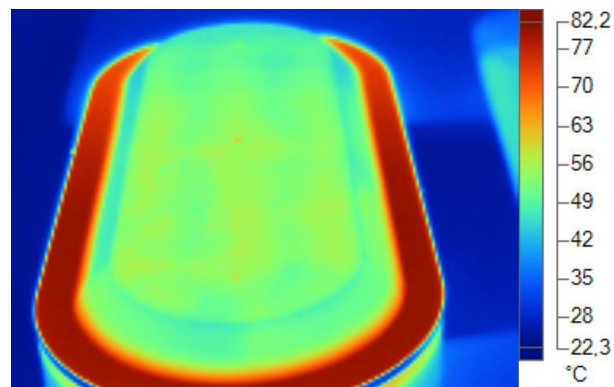


Figura 150. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza Emisividad Aleación Aluminio 0.6. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

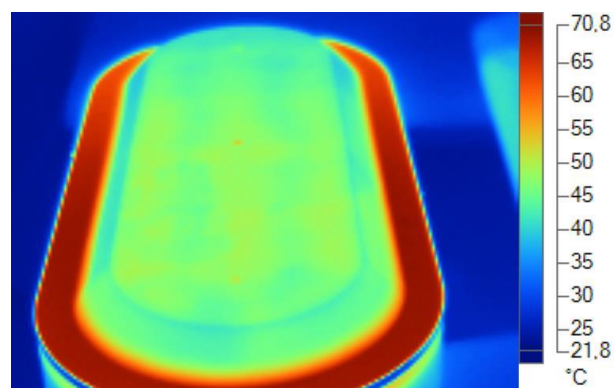


Figura 151. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

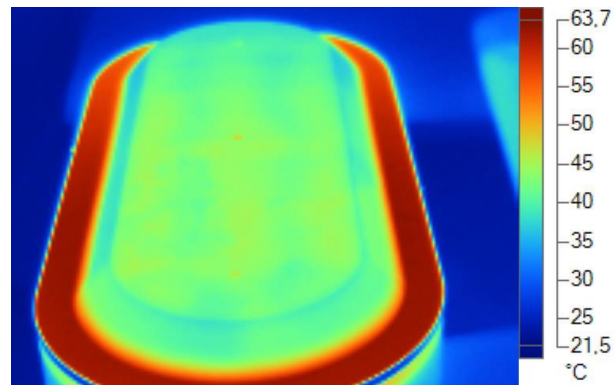


Figura 152. Datos térmicos del difusor. Zona verdosa. Emisividad Plástico 0.92. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

3.4.2. Datos termográficos NaviaP

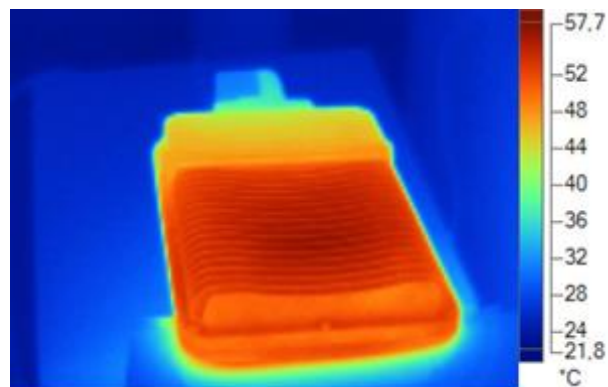


Figura 153. Datos térmicos del disipador. Zona rojiza. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

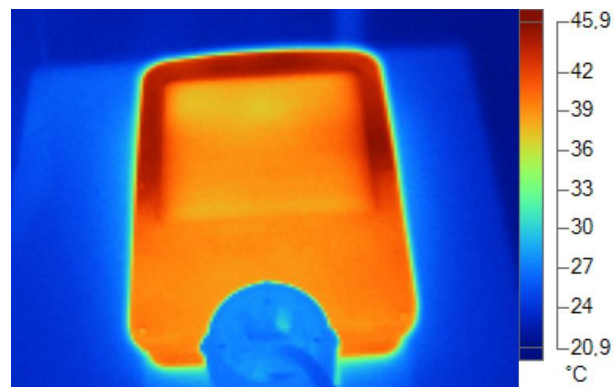


Figura 154. Datos térmicos del difusor. Zona cuadrada central color anaranjado. Emisividad Vidrio 0.94. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

3.4.3. Datos termográficos LH – GL1A

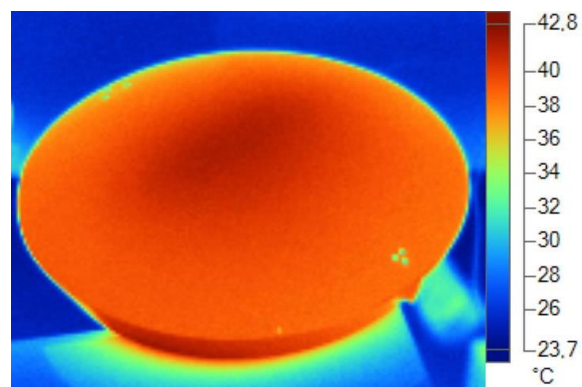


Figura 155. Datos térmicos de la carcasa. Zona rojiza. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

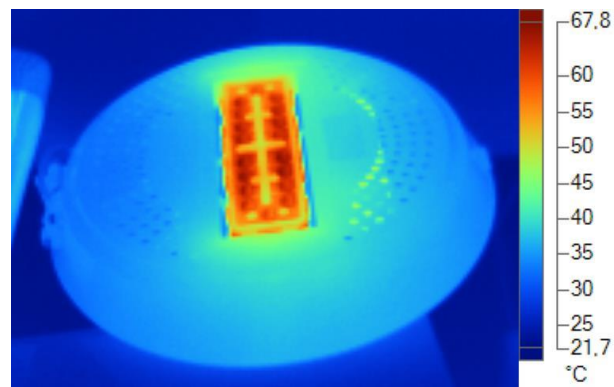


Figura 156. Datos térmicos del difusor. Zona rojiza. Emisividad Plástico 0.92.
Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

3.4.4. Datos termográficos T1A – 2 – 80

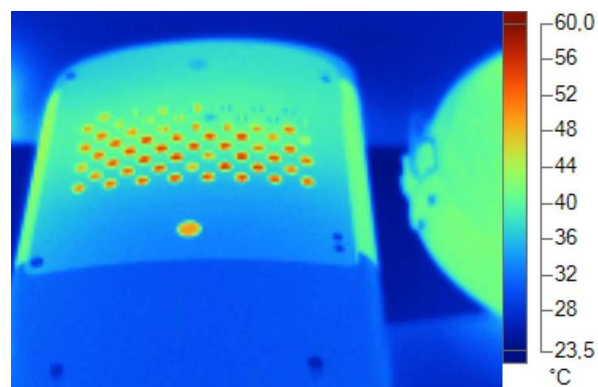


Figura 157. Datos térmicos de la carcasa / disipador. Zona rojiza. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

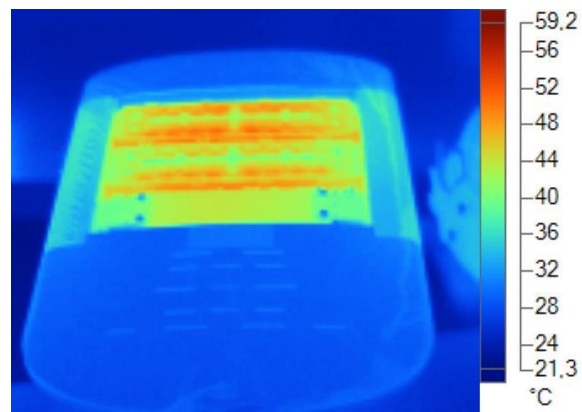


Figura 158. Datos térmicos del difusor. Zona rojiza. Emisividad Plástico 0.92.
Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

3.4.5. Datos termográficos Philips 20W

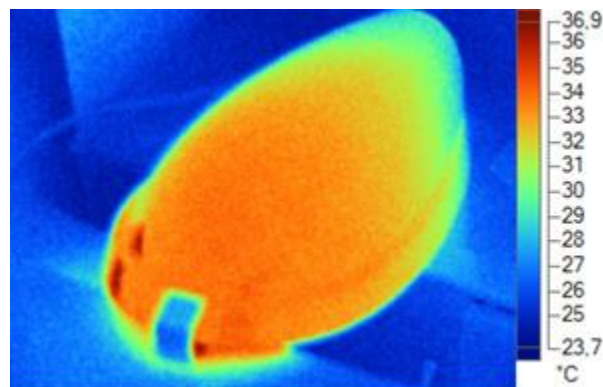


Figura 159. Datos térmicos de la carcasa. Zona anaranjada. Emisividad Aluminio Anodizado 0.77. Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

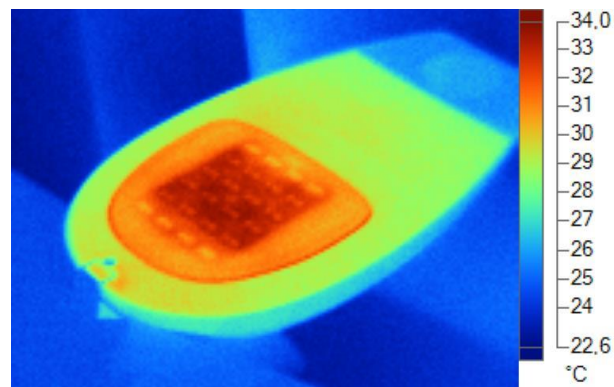


Figura 160. Datos térmicos del difusor. Zona rojiza. Emisividad plástico 0,92.

Fuente: elaboración propia a partir del software SmartView 4.1 Fluke

3.5. Evolución de la temperatura de las luminarias y temperaturas máximas de las mismas

En la figura 161, se representa la evolución de la temperatura a medida que el tiempo de funcionamiento aumenta.

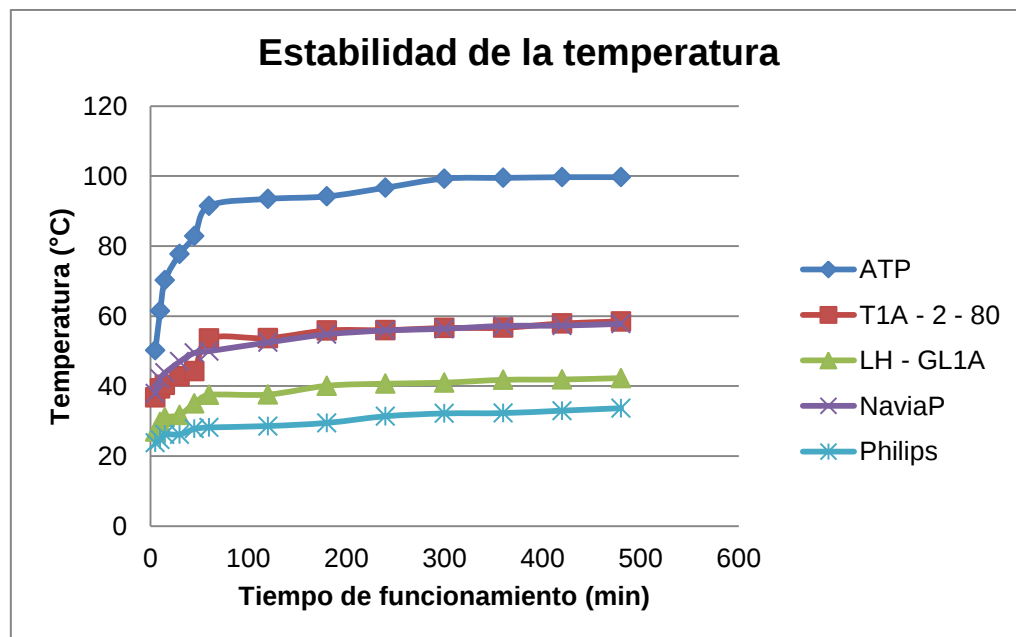


Figura 161. Tiempo de funcionamiento (min) vs Temperatura (°C). Fuente:
elaboración propia

La temperatura se mantiene estable aproximadamente a partir de las 5 horas de funcionamiento, como se observa en la figura 158. Se aprecia que la luminaria de ATP alcanza mayor temperatura debido a la potencia nominal de funcionamiento que es de 200W, sensiblemente mayor que el resto de luminarias. Tal y como podíamos imaginar.

	<i>Temperatura Máxima Disipador / Carcasa (°C)</i>	<i>Temperatura Máxima Difusor (°C)</i>
<i>ATP Aire Serie 7</i>	99.7	40.2
<i>Sóldy NaviaP</i>	57.7	39.3
<i>LH – GL1A</i>	42.3	67.8
<i>T1A – 2 – 80</i>	58.5	52.1
<i>Philips 20W</i>	33.7	34.0

Tabla 6. Tabla resumen de las temperaturas máximas de cada luminaria.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 6 se representa las temperaturas máximas obtenidas en la última medición de cada luminaria en el disipador o carcasa dependiendo de la luminaria y del difusor. Se aprecia que dependiendo del diseño, potencia, distribución de los LED y materiales, las temperaturas varían de unas luminarias a otras.

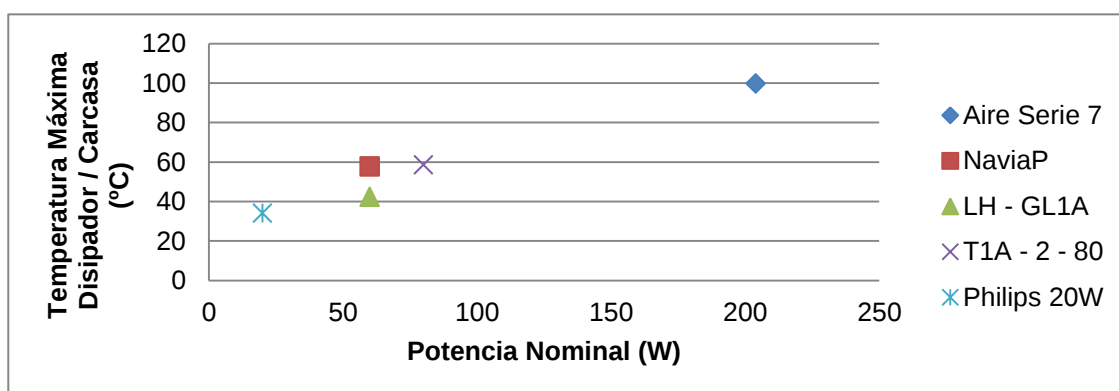


Figura 162. Potencia Nominal (W) de cada luminaria vs Temperatura Máxima Disipador / Carcasa (°C). Fuente: elaboración propia

En la figura 162 se representa la potencia nominal de cada luminaria frente a la temperatura máxima alcanzada en el disipador / carcasa de cada luminaria cuando se ha estabilizado la temperatura. Se observa que no hay linealidad de la potencia nominal respecto a la temperatura máxima alcanzada debido a los diferentes diseños de las propias luminarias y de los materiales característicos que forman las mismas. Con un diseño apropiado de la luminaria, teniendo una superficie de contacto del disipador suficiente y una selección de materiales donde la conductividad térmica es alta, se mejorarán los resultados de la disipación térmica. Tal y como se aprecia en la figura 162.

4. RESULTADOS

Obtenidos los resultados de las simulaciones del Modelo A y del Modelo B y la adquisición de los datos experimentales de las luminarias en el laboratorio, se va a proceder al estudio de los resultados. En primer lugar se va a incidir en los resultados teóricos de las simulaciones y en segundo lugar en los datos prácticos tomados en el laboratorio.

4.1. Resultados Estudio Teórico ANSYS Fluent

En los datos teóricos obtenidos de las simulaciones de ambos modelos se va a realizar una validación de los materiales que componen cada luminaria y después un análisis de los LED.

4.1.1. Validación de los materiales

La validación de los materiales consiste en la comparativa de la temperatura límite que puede alcanzar el material utilizado para su funcionamiento sin que haya problemas de deterioro con la temperatura máxima alcanzada en cada componente de la luminaria para observar si se supera la temperatura límite del material.

4.1.1.1. Comparativa Modelo A

Para el Modelo A se va a realizar la comparativa de las temperaturas máximas alcanzadas en cada componente con las temperaturas límites de los materiales que componen cada componente para cada una de las temperaturas ambientes que envuelven al modelo, esto queda reflejado en las tablas 7 – 9.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Temperatura límite del material (°C)</i>	<i>Temperatura en el modelo (°C)</i>
<i>Cubierta</i>	PC	145	70
<i>Disipador</i>	Aluminio	460	112
<i>Portaequipos</i>	PA66 – 30FV	150	77
<i>Equipos</i>	PA66 – 30FV	150	112
<i>Drivers</i>	Aluminio	460	112
<i>Difusor</i>	PC	145	100
<i>Chasis</i>	PA66 – 30FV	150	107
<i>PCB</i>	Aluminio	460	117

*Tabla 7. Temperaturas límite y máximas Modelo A a 20°C. Fuente:
elaboración propia*

En la tabla 7 se refleja que para el Modelo A con una temperatura ambiente de 20 °C no se supera las temperaturas límites de los materiales.

El estudio del Modelo A con una temperatura ambiente de 40 °C, siendo esta más restrictiva, no supera la temperatura límite de los materiales, como se observa en la tabla 8.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Temperatura límite del material (°C)</i>	<i>Temperatura en el modelo (°C)</i>
<i>Cubierta</i>	PC	145	90
<i>Disipador</i>	Aluminio	460	131
<i>Portaequipos</i>	PA66 – 30FV	150	97
<i>Equipos</i>	PA66 – 30FV	150	129
<i>Drivers</i>	Aluminio	460	130
<i>Difusor</i>	PC	145	118
<i>Chasis</i>	PA66 – 30FV	150	123
<i>PCB</i>	Aluminio	460	137

*Tabla 8. Temperaturas límite y máximas Modelo A a 40°C. Fuente:
elaboración propia*

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Temperatura límite del material (°C)</i>	<i>Temperatura en el modelo (°C)</i>
<i>Cubierta</i>	PC	145	42
<i>Disipador</i>	Aluminio	460	82
<i>Portaequipos</i>	PA66 – 30FV	150	47
<i>Equipos</i>	PA66 – 30FV	150	83
<i>Drivers</i>	Aluminio	460	84
<i>Difusor</i>	PC	145	69
<i>Chasis</i>	PA66 – 30FV	150	74
<i>PCB</i>	Aluminio	460	88

*Tabla 9. Temperaturas límite y máximas Modelo A a -10°C. Fuente:
elaboración propia*

En esta simulación la diferencia entre las temperaturas de los componentes y las temperaturas límites de los materiales son mayores. Es normal esta abultada diferencia debido a las condiciones de contorno impuestas que son de -10°C . Ver tabla 9.

En las figuras 163 y 165, se muestran una comparativa de algunos de los diferentes componentes del Modelo A para las distintas temperaturas ambientes de las simulaciones, dando soporte a las figuras 164 y 166 que muestran el rango de temperaturas al que se encuentran los componentes en las distintas temperaturas de contorno de las simulaciones.

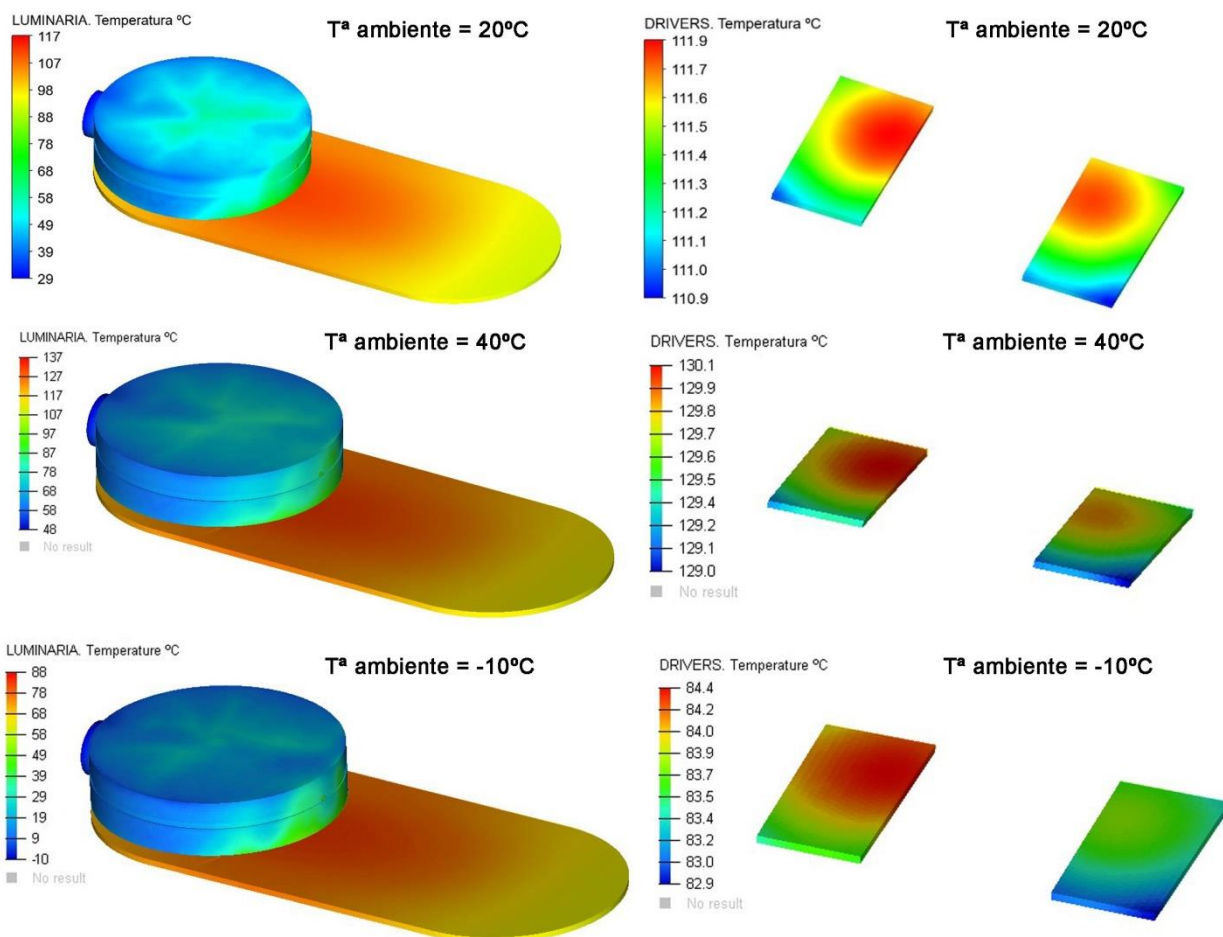


Figura 163. Comparativa del Modelo A de la Luminaria completa (izquierda) y de los Drivers (derecha) para diferentes temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

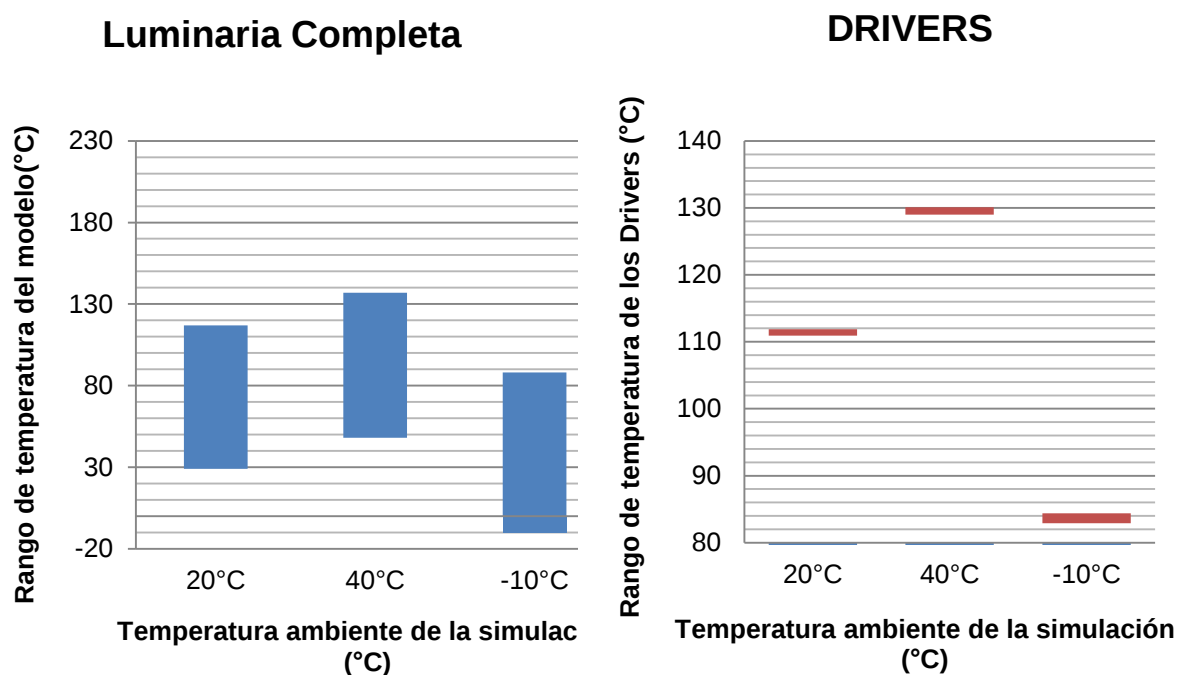


Figura 164. Rango de temperatura de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación del Modelo A. Fuente: elaboración propia

El material de los Drivers es de aluminio, cuya temperatura límite es de 460 °C, muy por encima de la temperatura máxima que se puede alcanzar en los Drivers.

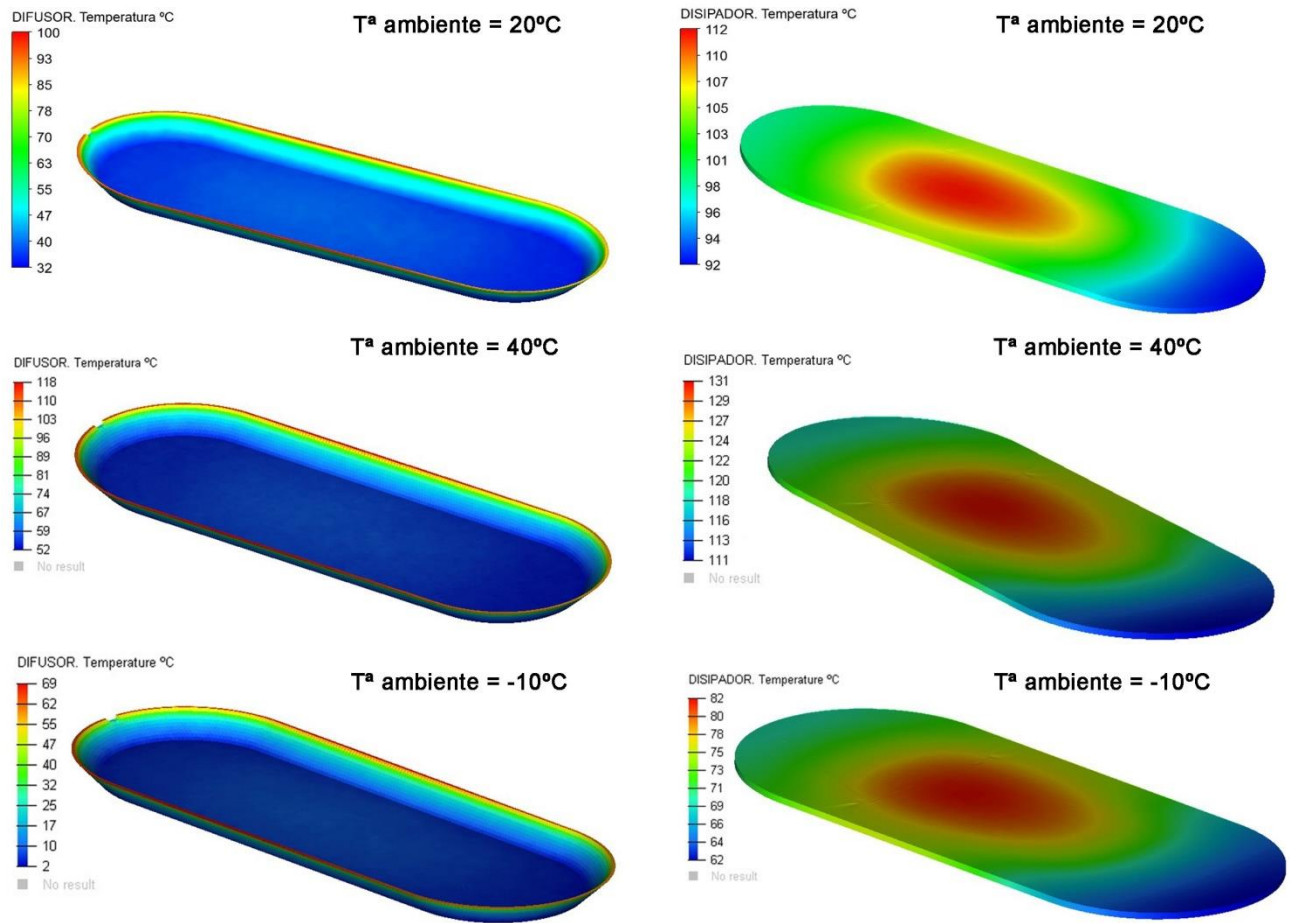


Figura 165. Comparativa del Modelo A del Difusor (izquierda) y del Disipador (derecha) para diferentes temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

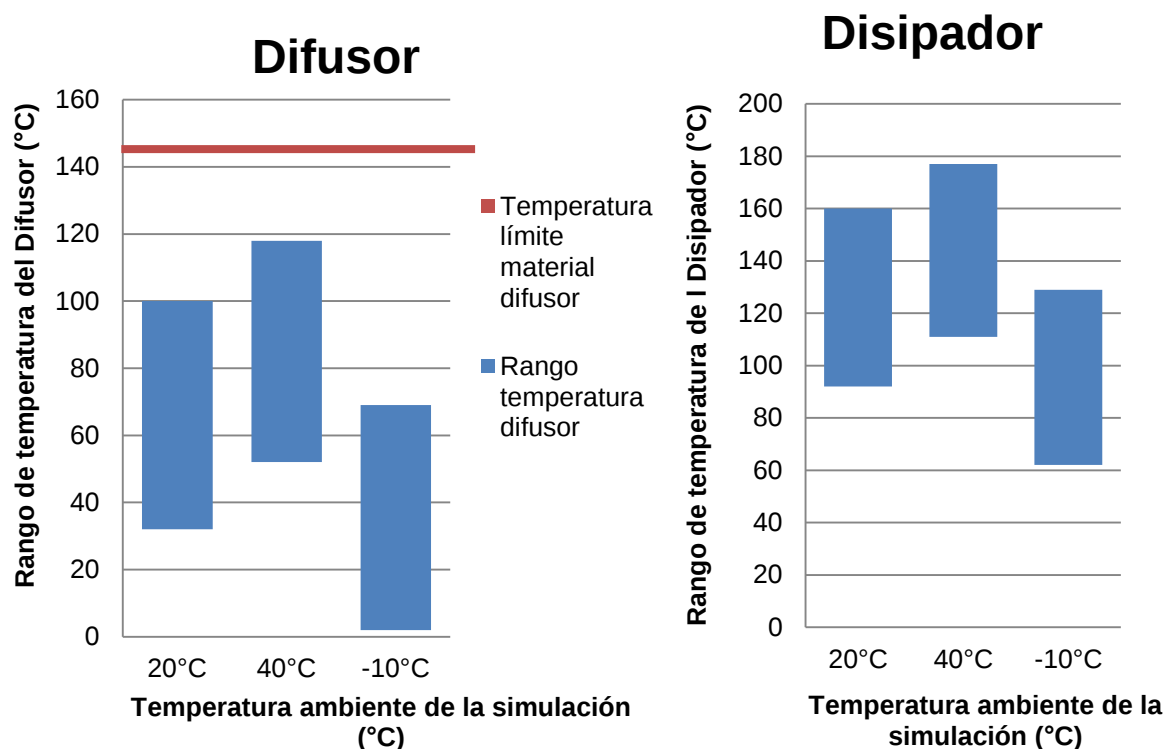


Figura 166. Rango de temperatura del difusor y del disipador respecto a la temperatura ambiente en cada simulación del Modelo A. Fuente: elaboración propia

El disipador es de aluminio, este material tiene una temperatura límite de 460 °C. La temperatura máxima que alcanza el disipador en las simulaciones son muy inferiores a la temperatura límite, como muestra la figura 166. El difusor está compuesto por PC (Policarbonato), este material tiene una temperatura límite de funcionamiento de 145 °C. Los resultados de las simulaciones muestran que las temperaturas máximas de este componente están por debajo de la temperatura límite como muestra la figura 166.

4.1.1.2. Comparativa Modelo B

Para el Modelo B se va a realizar la misma comparativa que en el Modelo A, fijándose en la temperatura máxima de cada componente con las temperaturas límites de los materiales que forman cada componente para cada una de la

temperaturas ambientes de simulación, que se puede observar en las tablas 10 – 12.

Componente	Material	Temperatura límite del material (°C)	Temperatura en el modelo (°C)
Cubierta	PC	145	145
Disipador	Aluminio	460	181
Carcasa Equipo	PA66 – 30FV	150	117
Drivers	Aluminio	460	117
Difusor	PC	145	67
Soporte	PA66 – 30FV	150	37
PCB	Aluminio	460	182

Tabla 10. Temperaturas límite y máximas Modelo B a 20°C. Fuente: elaboración propia

Para el Modelo B, la temperatura máxima de los componentes no supera a la temperatura límite de los materiales para una temperatura ambiente de 20 °C como se recoge en la tabla 10.

Componente	Material	Temperatura límite del material (°C)	Temperatura en el modelo (°C)
Cubierta	PC	145	162
Disipador	Aluminio	460	197
Carcasa Equipo	PA66 – 30FV	150	135
Drivers	Aluminio	460	136
Difusor	PC	145	86
Soporte	PA66 – 30FV	150	56
PCB	Aluminio	460	202

Tabla 11. Temperaturas límite y máximas Modelo B a 40°C. Fuente: elaboración propia

En este caso, la temperatura máxima de la cubierta supera la temperatura límite, ver tabla 11. Una de las posibles soluciones sería cambiar el material por otro con una temperatura límite superior como un PPA (Polyphthalamide) + 33% de fibra de vidrio cuya temperatura límite de funcionamiento es de 186°C [31], otras de las soluciones es modificar la geometría, donde se produzca una circulación de aire y haya refrigeración en la luminaria.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>	<i>Temperatura límite del material (°C)</i>	<i>Temperatura en el modelo (°C)</i>
<i>Cubierta</i>	PC	145	108
<i>Disipador</i>	Aluminio	460	156
<i>Carcasa Equipo</i>	PA66 – 30FV	150	88
<i>Drivers</i>	Aluminio	460	89
<i>Difusor</i>	PC	145	38
<i>Soporte</i>	PA66 – 30FV	150	7
<i>PCB</i>	Aluminio	460	161

*Tabla 12. Temperaturas límite y máximas Modelo B a -10°C. Fuente:
elaboración propia*

Todas las temperaturas de los componentes se encuentran por debajo las temperaturas límites con una temperatura ambiente de -10 °C.

En las siguientes figuras, figuras 167 y 169, se muestran una comparativa de los diferentes componentes del Modelo B para las distintas temperaturas ambientes de las simulaciones, dando soporte a las figuras 168 y 170 que muestran el rango de temperaturas al que se encuentran los componentes en las distintas temperaturas de contorno de las simulaciones.

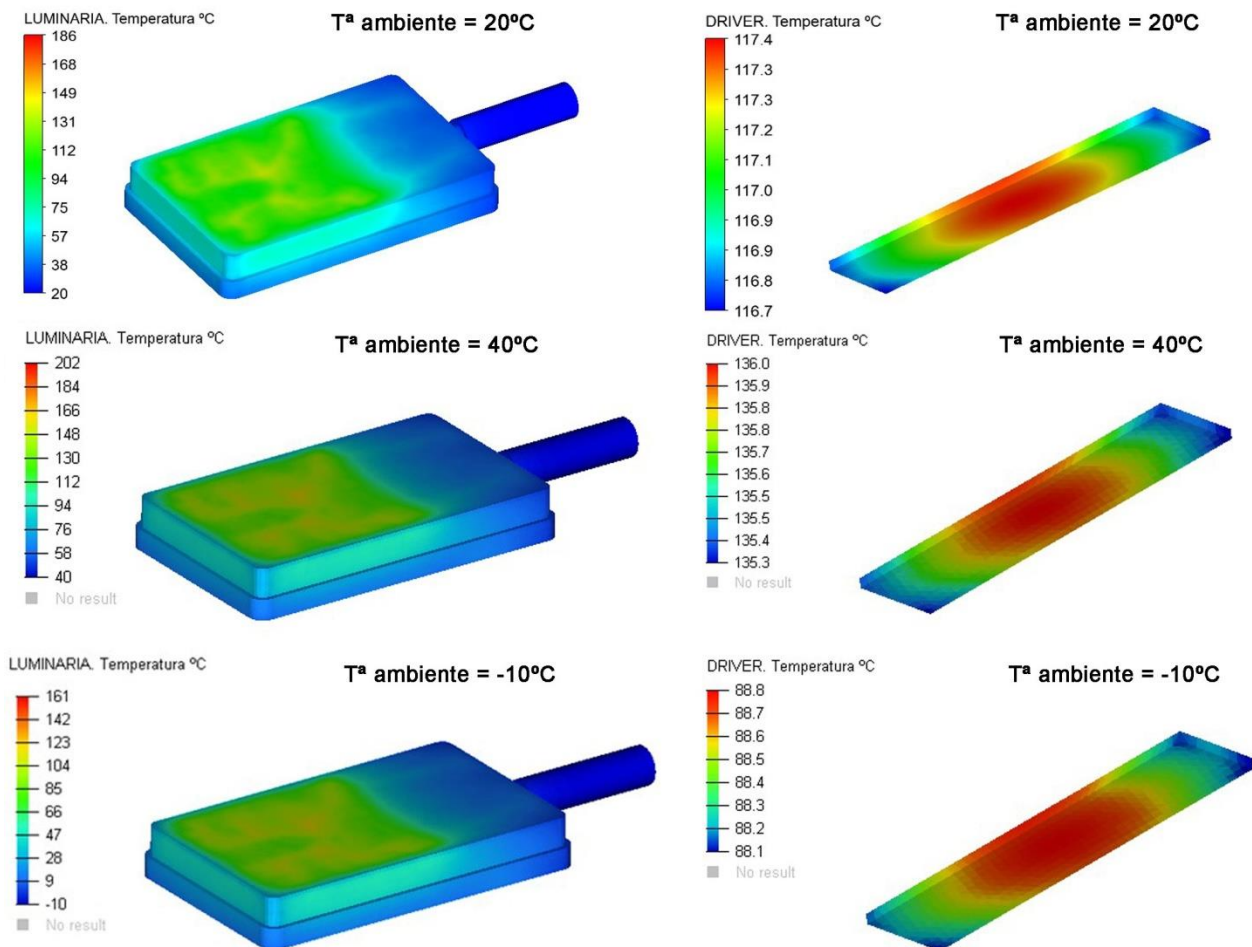


Figura 167. Comparativa del Modelo B de la Luminaria completa (izquierda) y de los Drivers (derecha) para diferentes temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

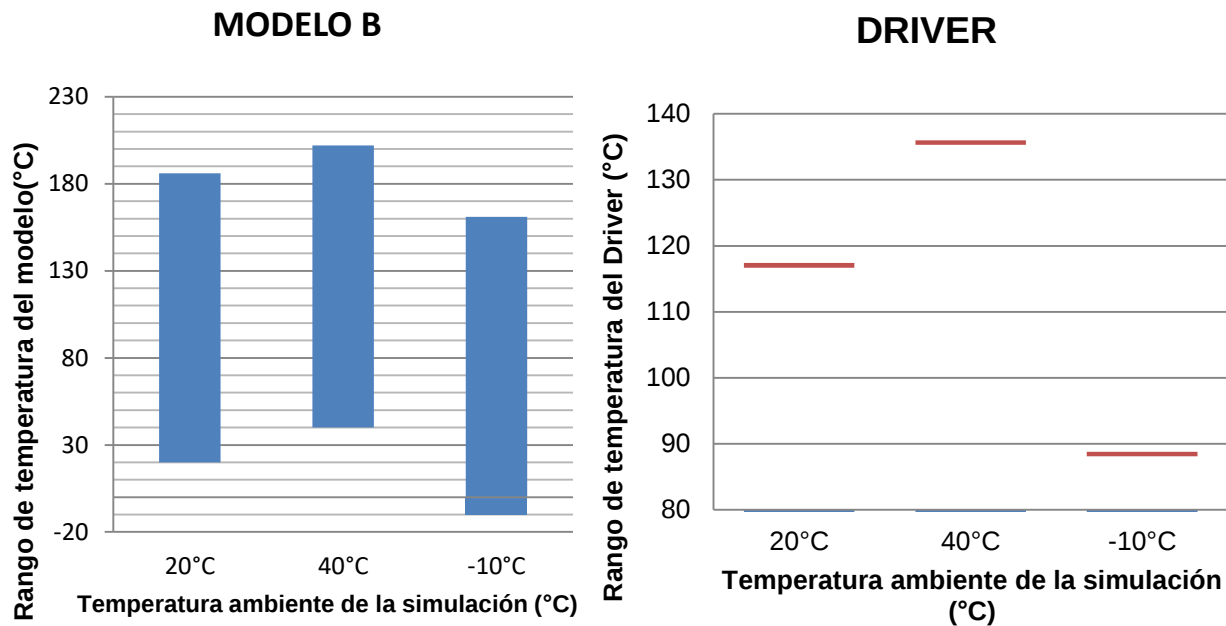


Figura 168. Rango de temperatura de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia

Lo mismo que en el Modelo A, el material de los Drivers es de aluminio, cuya temperatura límite es de 460 °C, muy por encima de la temperatura máxima que se puede alcanzar en los Drivers.

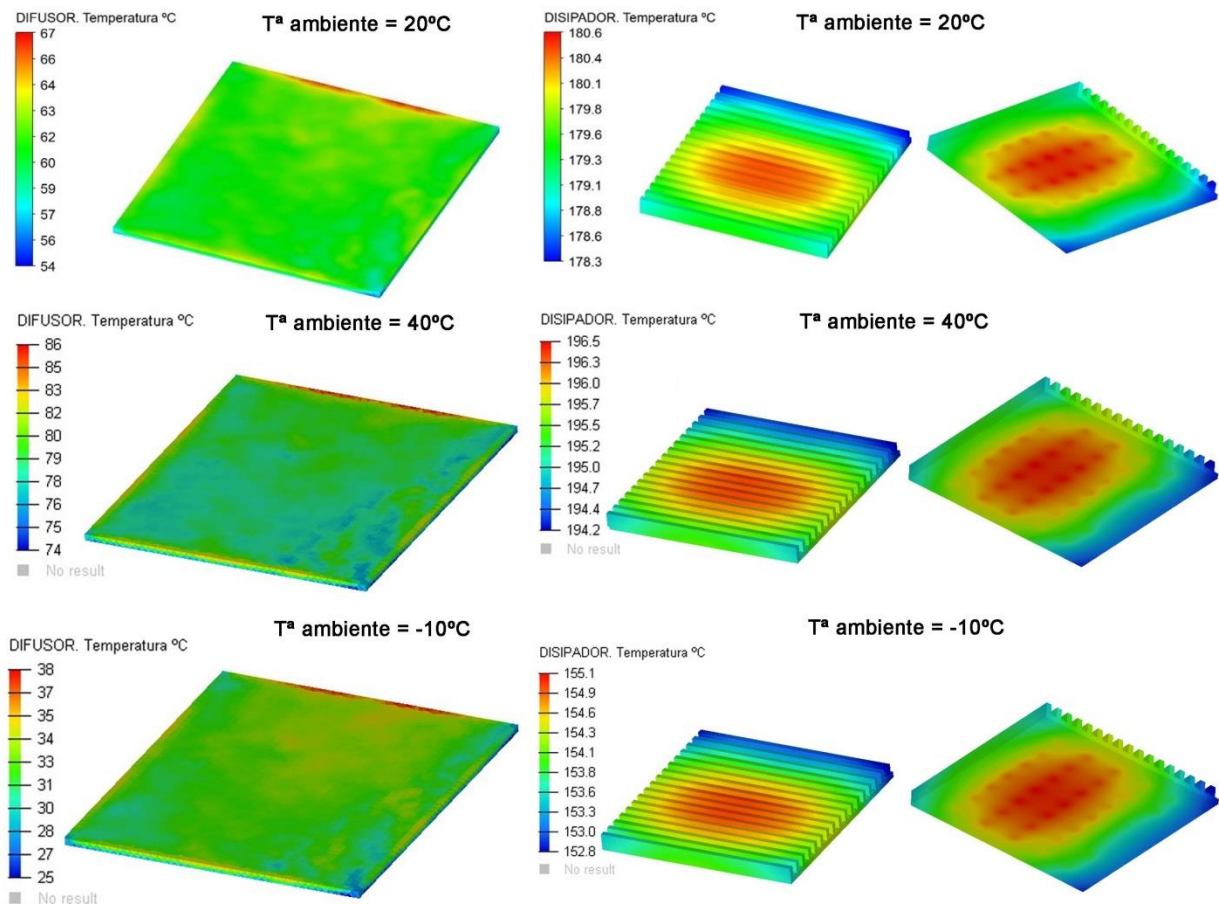


Figura 169. Comparativa del Modelo B del Difusor (izquierda) y del Disipador (derecha) para diferentes temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

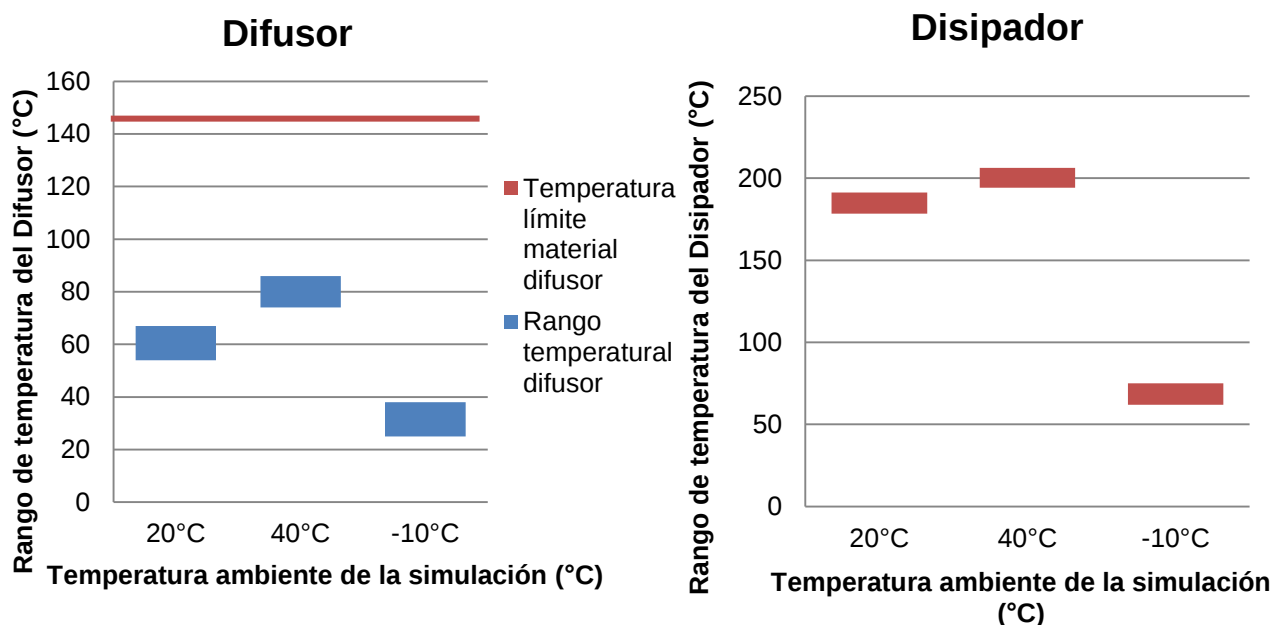


Figura 170. Rango de temperatura del difusor y del disipador respecto a la temperatura ambiente en cada simulación para el Modelo B. Fuente: elaboración propia

Igual que en el Modelo A, el disipador es de aluminio, este material tiene una temperatura límite de 460 °C. La temperatura máxima que alcanza el disipador en las simulaciones son muy inferiores a la temperatura límite, como muestra la figura 170. El difusor está compuesto por PC (Policarbonato), este material tiene una temperatura límite de funcionamiento de 145 °C. Los resultados de las simulaciones muestran que las temperaturas máximas de este componente están por debajo de la temperatura límite como muestra la figura 170.

4.1.2. Análisis de los LED. Temperatura de unión (T_j)

Para asegurar el tiempo de vida útil, la cantidad de eficiencia y el color de los LED, la temperatura de unión de los LED debe de ser mantenida en un rango específico.

Obteniendo la temperatura de unión de los LED en las simulaciones para las diferentes condiciones de contorno que envuelven la luminaria como son 40 °C, 20 °C y -10 °C, ver tabla 13, se compararán con las temperaturas de unión de LED que se encuentran en el mercado.

	Temperatura condiciones de contorno en la simulación (°C)	Temperatura de unión T_j (°C)
Modelo A	40	135
Modelo A	20	117
Modelo A	-10	86
Modelo B	40	202
Modelo B	20	186
Modelo B	-10	160

Tabla 13. Temperaturas de unión de los LED obtenidos en las simulaciones (T_j). Fuente: elaboración propia

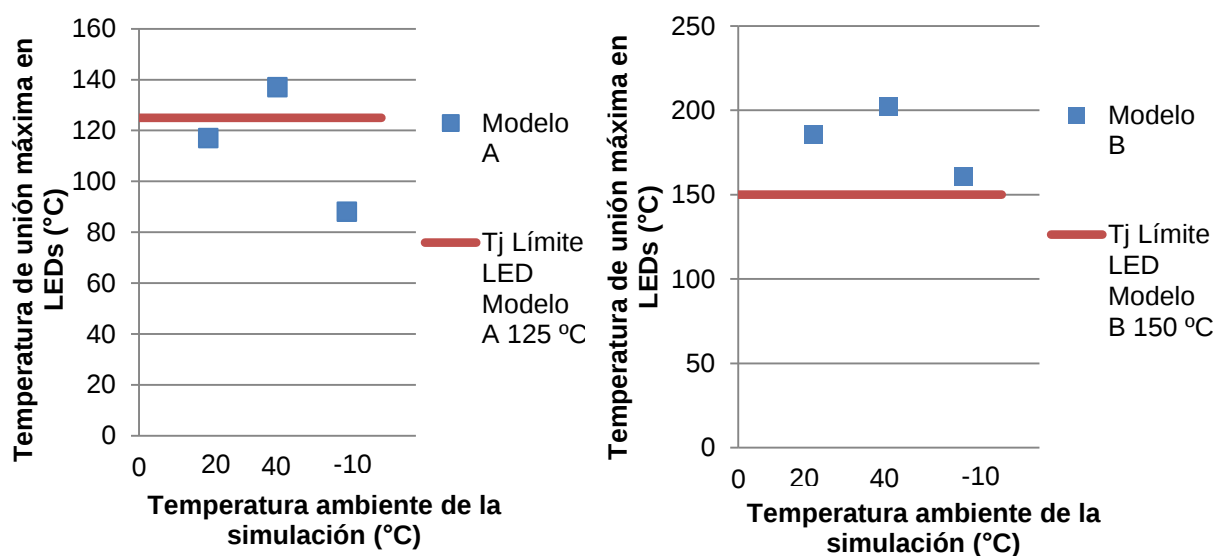


Figura 171. Variación de la temperatura máxima de unión de los LED respecto a la temperatura ambiente de la simulación para ambos modelos, marcándose la temperatura de unión límite de cada LED. Fuente: elaboración propia

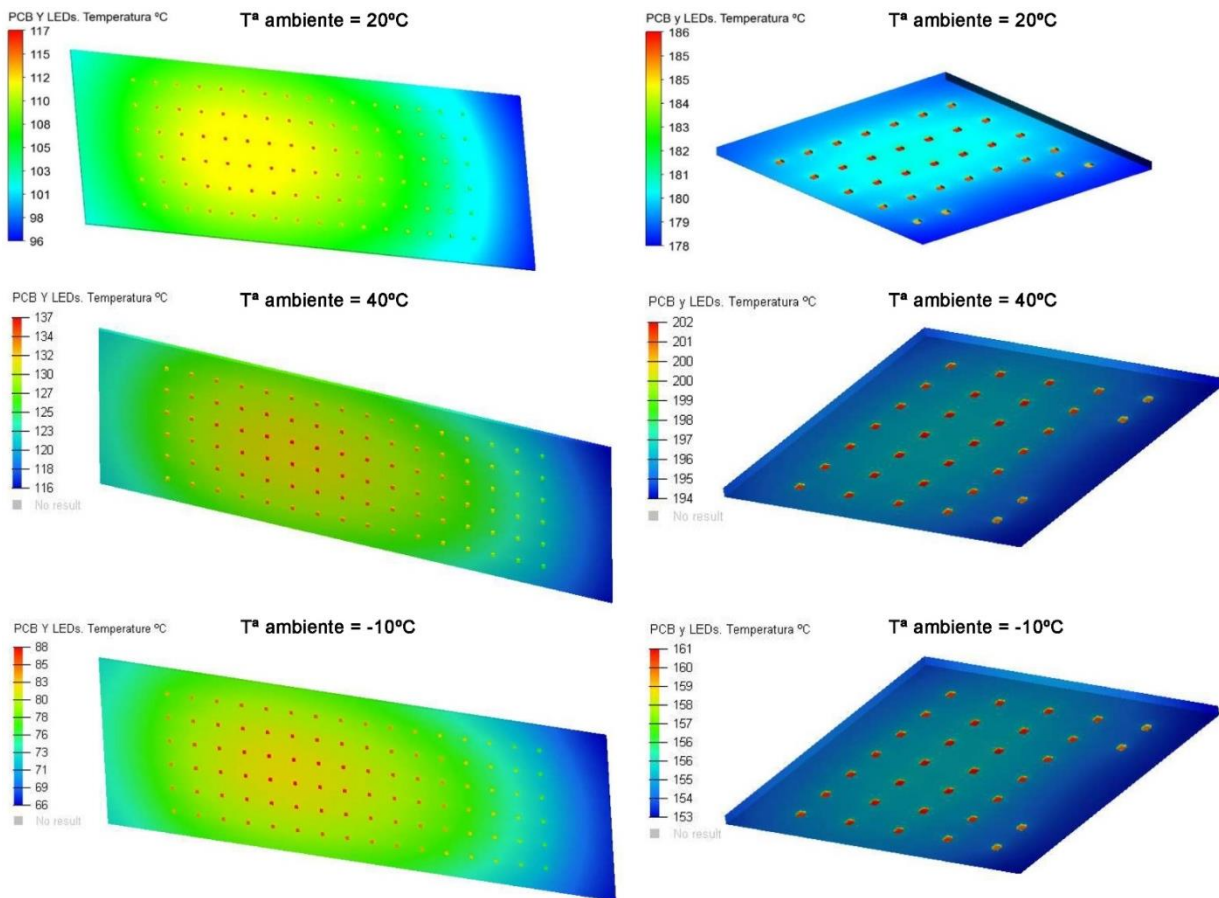


Figura 172. Resumen de las temperaturas de unión de los LED durante la simulación a distintas temperaturas ambientes en el Modelo A (izquierda) y Modelo B (derecha)

Se puede observar en la figura 171 que la temperatura de unión de los LED es muy dependiente de la temperatura ambiente que se encuentra alrededor de la luminaria.

Para el Modelo A, se ha utilizado un LED Osram LUW CQAR (streetwhite) con su respectiva hoja de características [32]. Se ha elegido para tomar nota de las dimensiones del LED con la potencia de 2W/LED y así tener una orientación para las características. La temperatura de unión de este LED se corresponde con una temperatura de 125°C. Ver figura 168. En esta luminaria la temperatura máxima que

se alcanza se encuentra 10°C por encima del valor de la temperatura de unión del LED lo que ocasionará una disminución de la vida útil del LED, posiblemente causando que la salida de luz del LED disminuya irreversiblemente a largo plazo a una velocidad más rápida que a temperaturas más bajas [5]. El control de la temperatura de los LED es, por lo tanto, uno de los aspectos más importantes del rendimiento óptimo de los sistemas LED [1].

En las siguientes gráficas se puede observar como importantes parámetros del LED varían con la temperatura de unión que vienen recogidos en la hoja de características proporcionada por el fabricante. En la figura 173 se muestra como el flujo lumínico decae conforme se aumenta la temperatura de unión. Para la temperatura de unión máxima a la que se encuentra el Modelo A que es de 135 °C, (línea roja de la figura 10) los LED se encuentran con una disminución del 20% del flujo luminoso.

Flujo luminoso relativo

$$\Phi_V / \Phi_V (25^\circ\text{C}) = f(T_j); I_F = 700 \text{ mA}$$

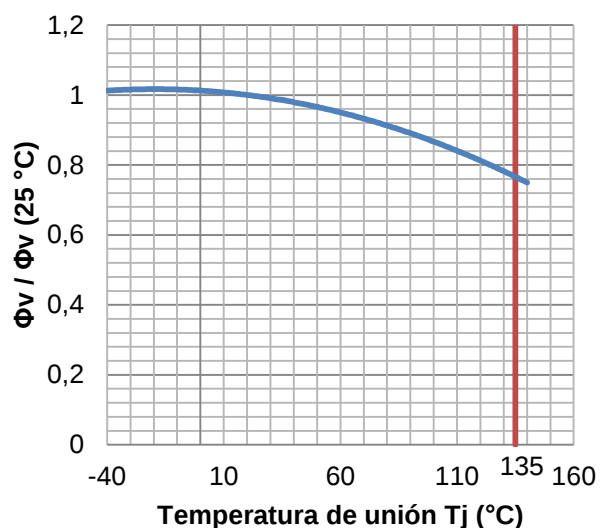


Figura 173. Temperatura de Unión (T_j) vs Flujo Lumínico. Modelo A. Fuente: elaboración propia y Hoja de características LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

Al aumentar la temperatura de unión del LED la potencia que se percibe como luz por el ojo humano disminuye.

En la figura 174 se muestra la variación de las coordenadas de cromaticidad respecto al cambio de la temperatura de unión. Para la temperatura de unión máxima a la que se encuentran los LED del Modelo A (línea verde de la figura 174) se muestra que la variación de las coordenadas de cromaticidad son importantes.

Cambio de coordenadas de cromaticidad

$$Cx, Cy = f(T_j); I_F = 700 \text{ mA}$$

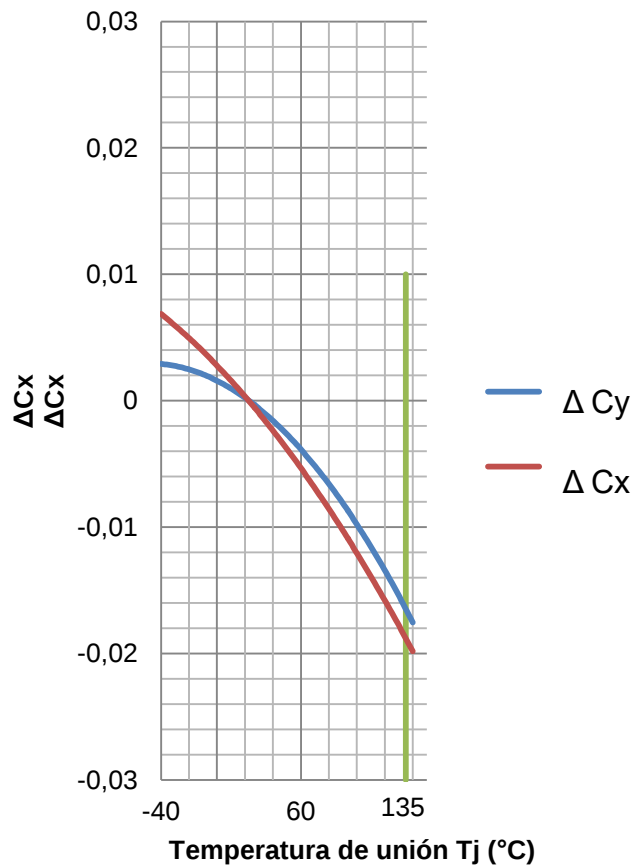


Figura 174. Temperatura de Unión (T_j) vs Cambio de coordenadas de cromaticidad. Modelo A. Fuente: elaboración propia y Hoja de características LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

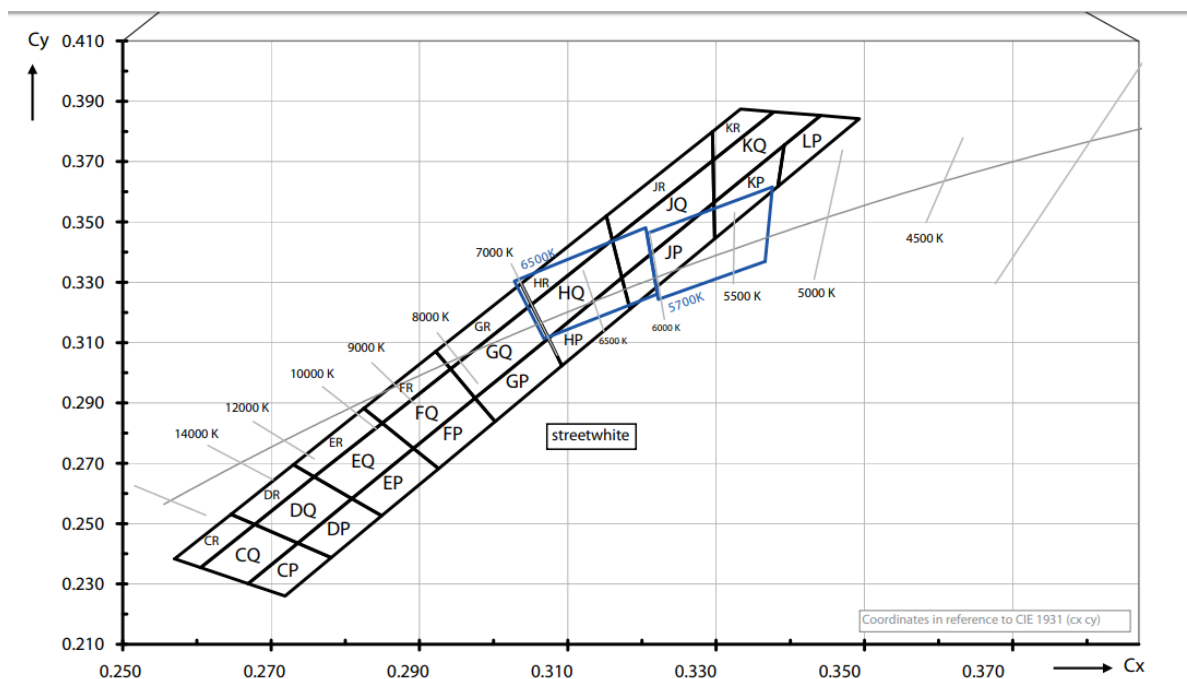
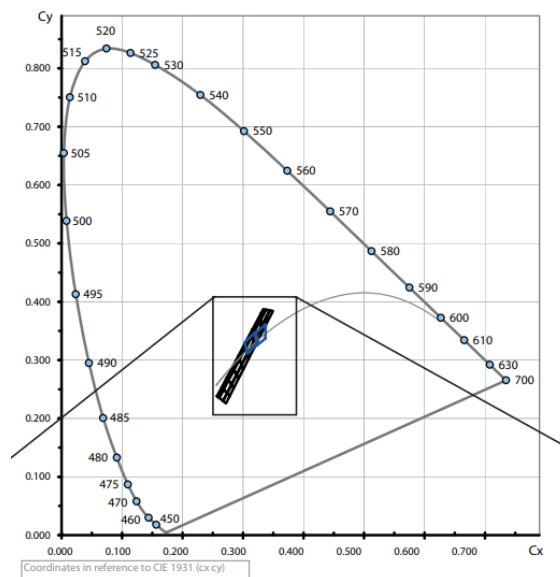


Figura 175. Coordenadas de cromaticidad. Modelo A. Fuente: Hoja de características LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

Alterando la temperatura de unión del LED la variación de las coordenadas de cromaticidad están presentes, donde la calidad de color de la luz empeora. Para una temperatura de unión máxima de 135 °C que es alcanzada en el Modelo A en la

simulación más extrema de 40 °C, la variación de cromaticidad varía provocando una disminución de la calidad del color de la luz del LED, desplazándose en el diagrama de cromaticidad entorno al 20%.

Por otro lado, el Modelo B dispone de un LED Cree XLamp XP-G3 LED donde se determinan las propiedades y características en su hoja de características [33]. La temperatura de unión máxima para este LED es de 150°C. Ver figura 168. En este caso la temperatura máxima se encuentra muy por encima del valor de la temperatura de unión del LED. Esto ocasionaría una velocidad de deterioro del LED muy superior al valor estándar [5]. En la figura 176 se observa que en el aumento de la temperatura de unión disminuye el flujo lumínico un 20% donde la temperatura de unión máxima alcanzada en la simulación más extrema de 40 °C es de 202 °C (línea roja de la figura 176), debido a las propiedades luminotécnicas de este LED.

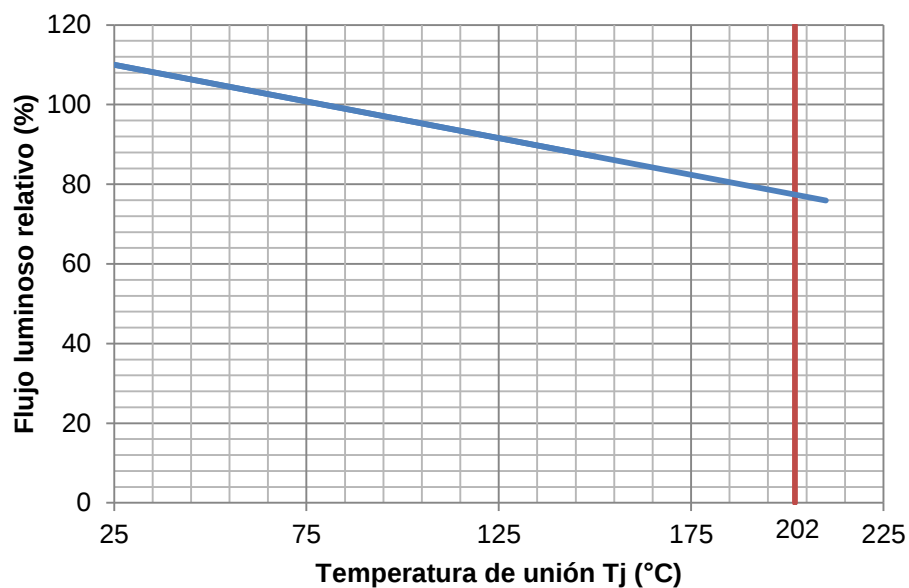


Figura 176. Temperatura de Unión (Tj) vs Flujo Lumínico Relativo. Modelo B.
Fuente: Elaboración propia y Hoja de características LED Cree XLamp XP-G3

Si en vez de este tipo LED se hubiese utilizado el mismo LED que en el Modelo A, los resultados serían más desfavorables conforme observamos en la figura 177, no habiendo flujo luminoso en este LED.

Flujo luminoso relativo

$$\Phi_v / \Phi_v (25^\circ\text{C}) = f(T_j); I_F = 700 \text{ mA}$$

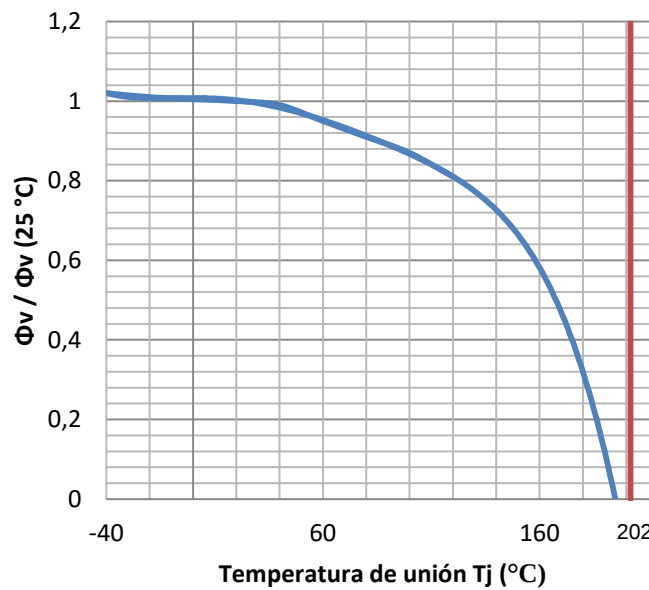


Figura 177. Temperatura de Unión (T_j) vs Flujo Lumínico. Modelo B. Fuente: elaboración propia y Hoja de características LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

4.2. Resultados Experimentales. Cámara Termográfica FLUKE Ti 25

Cuando se han adquirido los datos experimentales en el laboratorio de luminotecnia con las diferentes luminarias, se ha procedido a realizar una gráfica, figura 173, que representa la evolución de la temperatura a medida que el tiempo de funcionamiento aumenta.

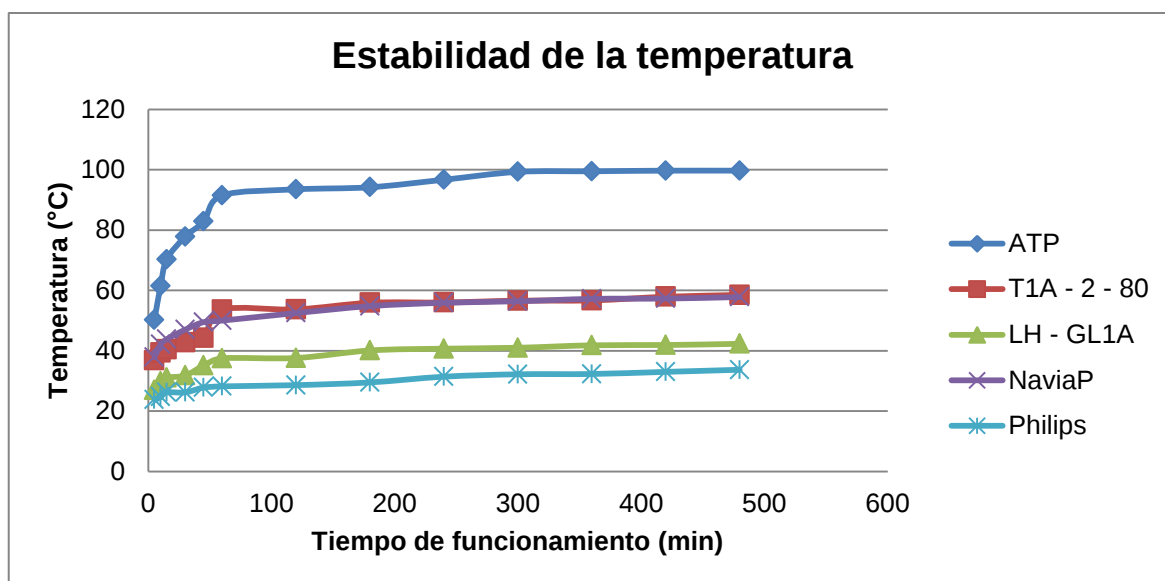


Figura 178. Tiempo de funcionamiento (min) vs Temperatura (°C). Fuente: elaboración propia

La temperatura se mantiene estable aproximadamente a partir de las 5 horas de funcionamiento, como se observa en la figura 178. Se aprecia que la luminaria de ATP alcanza mayor temperatura debido a la potencia nominal de funcionamiento que es de 200W, es mayor que el resto de luminarias.

	Temperatura Máxima Disipador / Carcasa (°C)	Temperatura Máxima Difusor (°C)
ATP Aire Serie 7	99.7	40.2
Sólidy NaviaP	57.7	39.3
LH – GL1A	42.3	67.8
T1A – 2 – 80	58.5	52.1
Philips 20W	33.7	34.0

Tabla 14. Tabla resumen de las temperaturas máximas de cada luminaria. Fuente: elaboración propia

En la tabla 14 se representa las temperaturas máximas obtenidas en la última medición de cada luminaria en el disipador o carcasa dependiendo de la luminaria y del difusor. Se aprecia que dependiendo del diseño, potencia, distribución de los LED, materiales, las temperaturas varían de unas luminarias a otras.

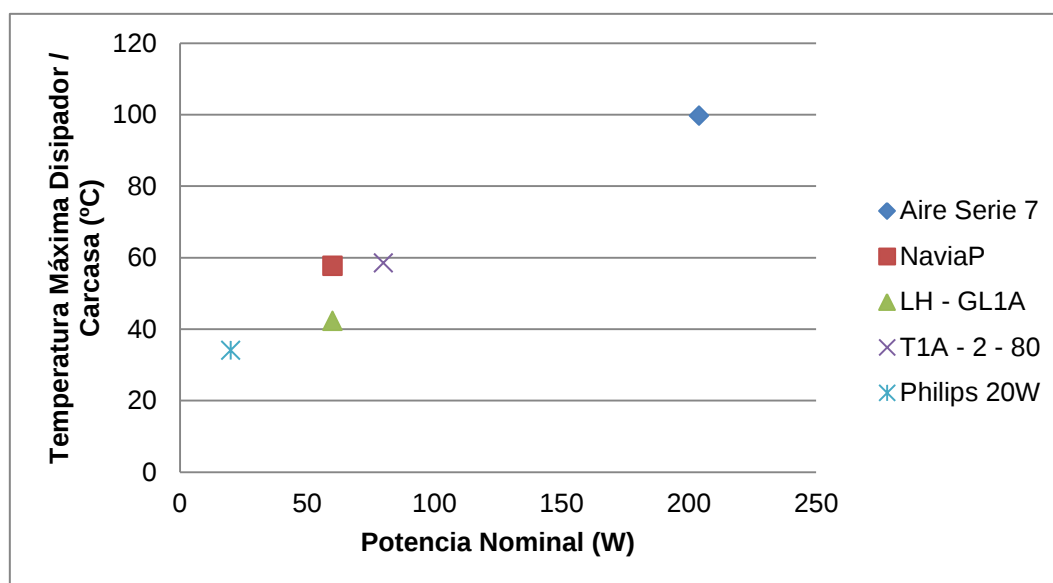


Figura 179. Potencia Nominal (W) de cada luminaria vs Temperatura Máxima Disipador / Carcasa (°C). Fuente: elaboración propia

En la figura 179 se representa la potencia nominal de cada luminaria frente a la temperatura máxima alcanzada en el disipador / carcasa de cada luminaria cuando se ha estabilizado la temperatura. Se observa que no hay linealidad de la potencia nominal respecto a la temperatura máxima alcanzada debido a los diferentes diseños de las propias luminarias y de los materiales característicos que forman las mismas. Con un diseño apropiado de la luminaria, teniendo una superficie de contacto del disipador suficiente y una selección de materiales donde la conductividad térmica alta se mejorarán los resultados de la disipación térmica.

5. DISCUSIÓN

Para el buen funcionamiento de las luminarias y en especial los LED, se debe, como se ha ido comentando a lo largo de este estudio, mantener la

temperatura en un rango de operación. Las temperaturas altas en los componentes electrónicos no son adecuadas por lo tanto hay que disipar el calor de alguna forma.

El estudio consiste en dos partes: la primera parte trata del cálculo teórico sobre dos modelos de luminarias para ver la disipación térmica que se producen en ellas a través de la dinámica de fluidos computacional con el software de simulación ANSYS Fluent y la segunda parte consiste en la adquisición de datos experimentales a través de una cámara termográfica FLUKE TI 25 en el laboratorio de luminotecnia de diferentes luminarias que se encuentran en el mercado.

En la primera parte para el cálculo teórico se utilizan dos modelos denominados Modelo A y Modelo B. El Modelo A consiste en una luminaria de último diseño donde el disipador se encuentra directamente en contacto con el aire exterior lo cual beneficia a la disminución de la temperatura en los LED. La potencia nominal de este modelo es de 200W, siendo una luminaria de alta potencia. El Modelo B se encuentra con un diseño correspondiente a las antiguas luminarias de descarga donde se ha cambiado el interior de la luminaria por una tecnología LED. Este modelo tiene una potencia nominal de 60W, una potencia mucho menor que el Modelo A.

Se calcula una batería de simulaciones para cada modelo donde se varía la temperatura ambiente que envuelve el modelo, siendo estas temperaturas de 20°C, 40°C y -10°C.

Los resultados de las simulaciones muestran una gran diferencia de temperaturas entre el Modelo A y el Modelo B, siendo las temperaturas mucho más altas en el Modelo B que en el Modelo A. El Modelo B, cuya potencia nominal es de 60W, tiene una temperatura mucho más elevada que el Modelo A, con una potencia nominal de 200W, esto define que la potencia nominal genera calor pero el diseño es un factor importante para la disipación del calor. Ver figura 180.

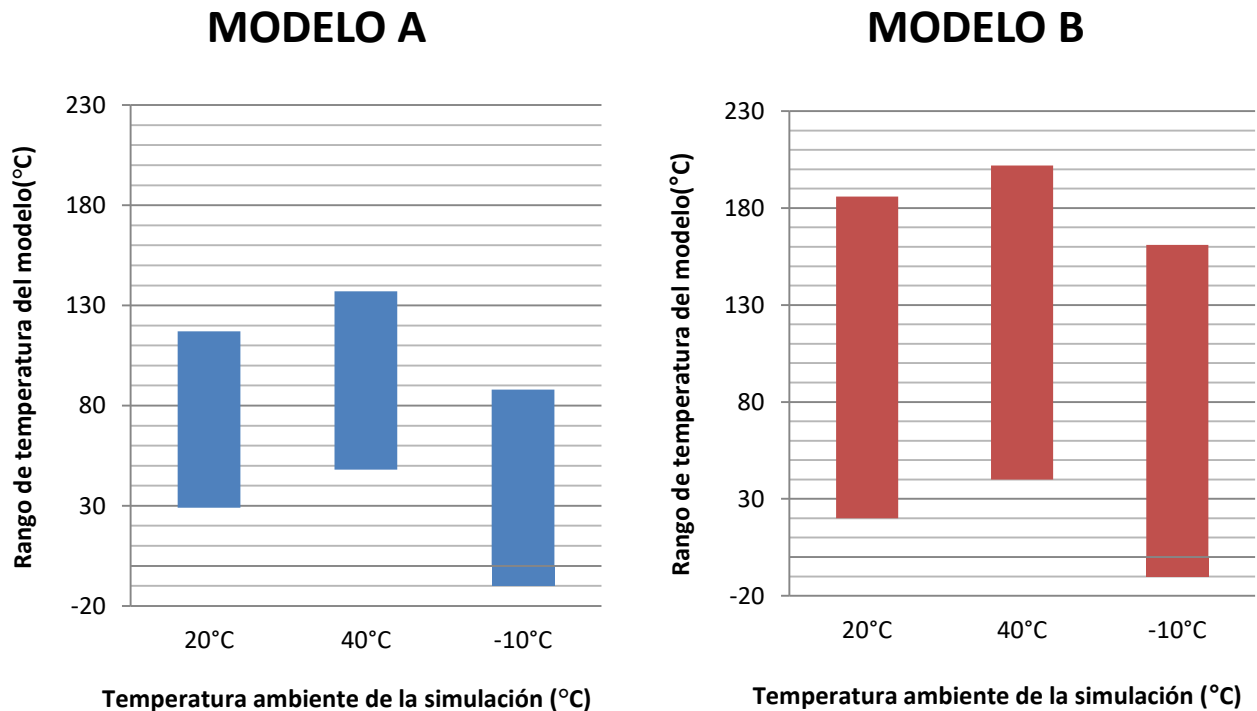


Figura 180. Rango de temperatura de cada modelo respecto a la temperatura ambiente en cada simulación

En la figura 181 se muestra un resumen de las temperaturas de unión de los LED y de la PCB (Printed Circuit Board, en español, placa de circuito impreso) de ambos modelos y para las distintas temperaturas ambientales que envuelven a los modelos.

Se observa que la diferencia de las temperaturas de unión de los LED en los resultados de las simulaciones de cada modelo dependen de la temperatura ambiente. Se ha comentado antes que el Modelo A tiene mayor potencia que el Modelo B pero el Modelo B alcanza una temperatura de unión en los LED más elevada incluso teniendo los mismos materiales en los componentes, por lo que determina que el diseño de los modelos está implicado en la disipación térmica de la luminaria. Ver figura 181.

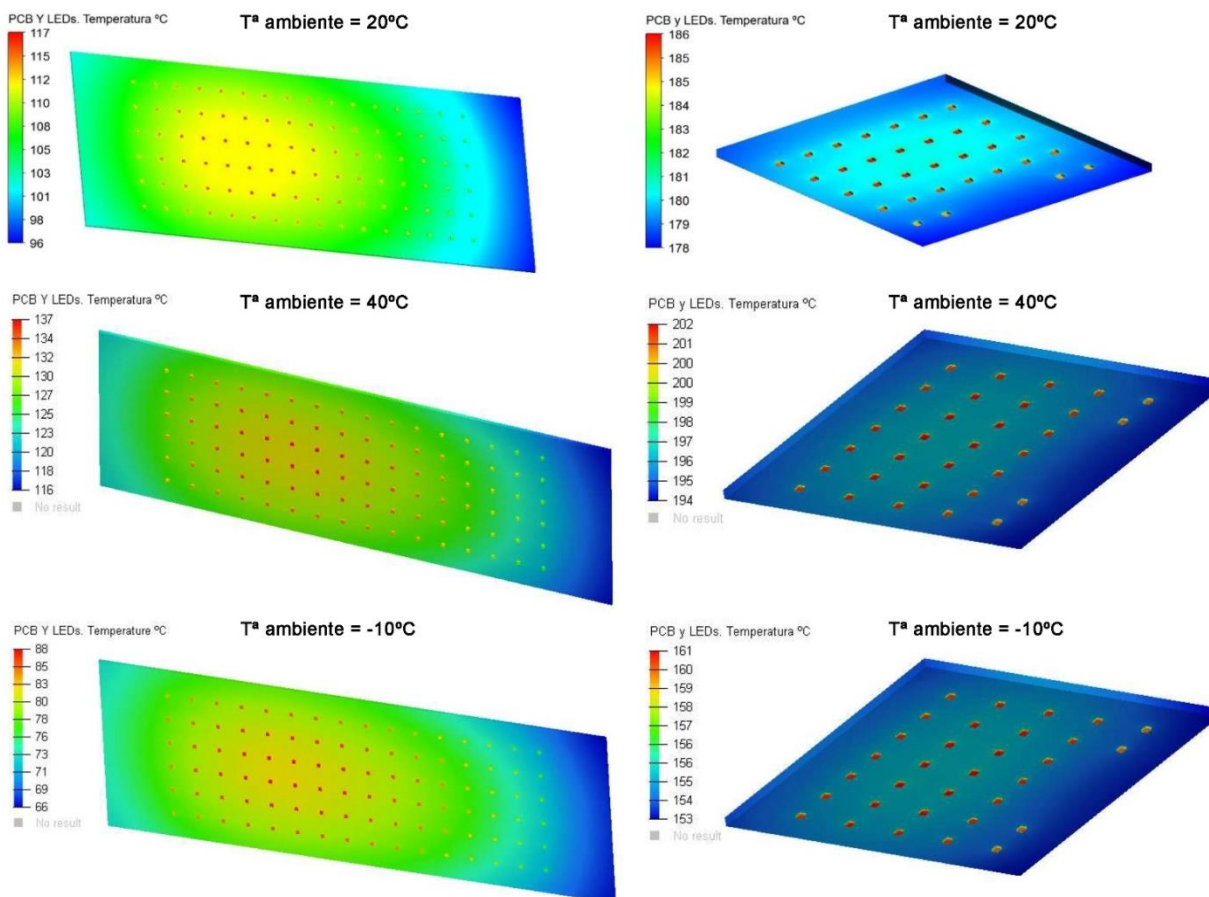


Figura 181. Resumen de las temperaturas de unión de los LED y PCB durante la simulación a distintas temperaturas ambientes en el Modelo A (izquierda) y Modelo B (derecha)

En la segunda parte del estudio, se realiza la adquisición de datos experimentales para cinco luminarias con una cámara termográfica FLUKE TI 25. Se conectan las luminarias a la red eléctrica y se va midiendo la temperatura para observar el calentamiento de las luminarias y obtener los datos de temperatura cuando esta temperatura se mantiene estable.

Las cinco luminarias son de potencias diferentes con diseños diferentes y con componentes de distintos materiales. En la figura 182 se recogen las temperaturas máximas obtenidas en el disipador / carcasa de las luminarias respecto a la potencia nominal de cada una de ellas. Se demuestra con la figura 182 que la potencia

nominal de las luminarias generan calor pero lo importante es el diseño de las luminarias y materiales de los componentes debido a que con diferentes luminarias con potencias superiores se obtienen temperaturas más bajas que luminarias donde la potencia es inferior y se alcanzan unas temperaturas más elevadas.

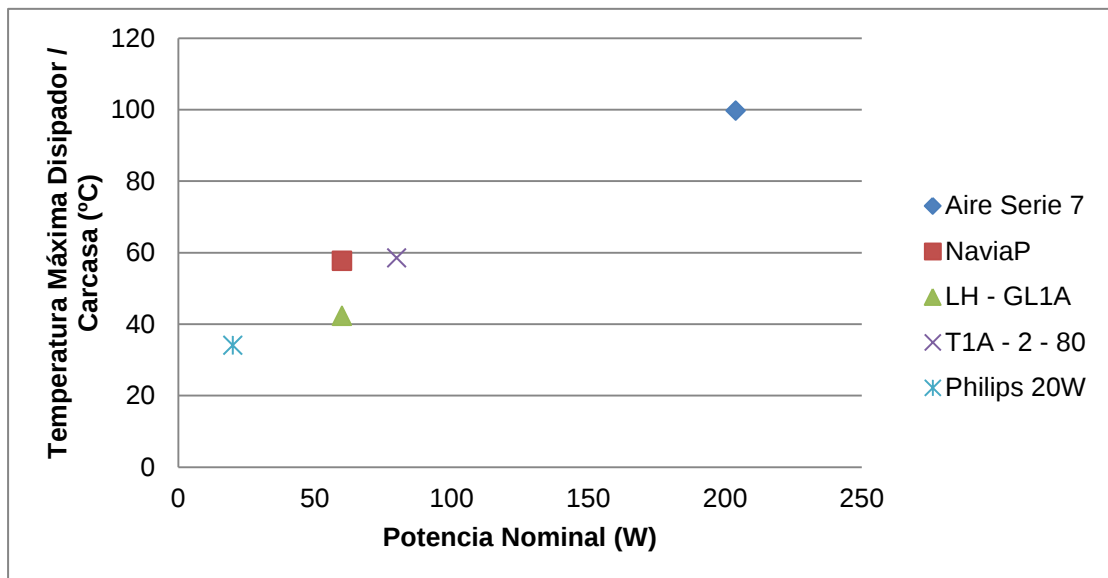


Figura 182. Potencia Nominal (W) de cada luminaria vs Temperatura Máxima Disipador / Carcasa (°C) Laboratorio Cámara Termográfica FLUKE Ti 25.

Fuente: elaboración propia

Tanto en los modelos de las simulaciones para el cálculo teórico como en las luminarias donde se han adquirido datos experimentales en el laboratorio tienen una potencia nominal diferente. Se demuestra con las figuras 181 y 182 que la potencia nominal de los modelos y las luminarias generan calor pero lo importante es el diseño de las luminarias y materiales de los componentes debido a que con diferentes luminarias con potencias superiores se obtienen temperaturas más bajas que luminarias donde la potencia es inferior y se alcanzan unas temperaturas más elevadas.

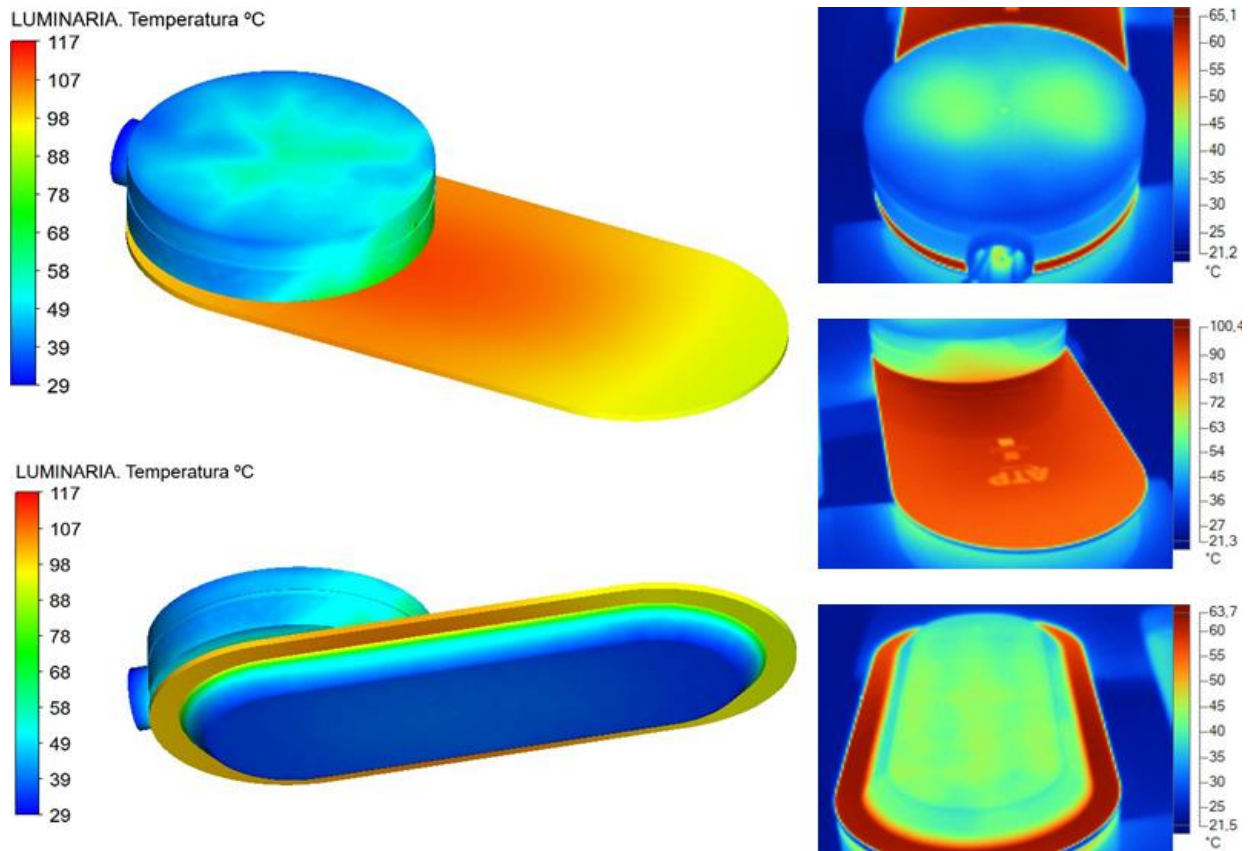


Figura 183. Comparativa datos teóricos Modelo A (izquierda) y experimentales ATP Aire Serie 7 (derecha)

Una comparativa para la correlación de los datos teóricos y experimentales entre el Modelo A y la luminaria ATP Aire Serie 7. Los datos teóricos y experimentales varían levemente, en la figura 183 se observa la comparativa de los datos teóricos del Modelo A y los datos experimentales para la luminaria ATP Aire Serie 7. El fin de la simulación es obtener una aproximación de los resultados del modelo sin tener operativo el producto. Tener la información precisa de la geometría y de los materiales es fundamental para que los resultados sean los más exactos posibles.

6. CONCLUSIÓN

El fin de este estudio es comparar los resultados de las simulaciones térmicas con los datos experimentales adquiridos en el laboratorio. Los principales objetivos son recopilados y concluidos en esta sección.

El objetivo de realizar la simulación antes de la producción es analizar y experimentar los procesos y productos en un entorno virtual, reduciendo los requisitos de tiempo y coste asociados a las pruebas realizadas.

Este estudio está enfocado en el análisis térmico para realizar la verificación de los materiales de las luminarias y comprobar que la temperatura de los LED no es demasiado alta para el buen funcionamiento de estos diodos emisores de luz, provocando una disminución de la vida útil y una variación de las propiedades lumínicas de los LED. Todos los dispositivos electrónicos y los circuitos generan un exceso de calor y requieren una mayor atención para evitar fallos prematuros. Los LED convierten el 15% de la energía aplicada en luz y el 85% restante en calor, este calor debe ser disipado para que la durabilidad y propiedades de los LED no se vean afectadas por el incremento de temperatura [10].

Las simulaciones térmicas dan al ingeniero información sobre la temperatura y el flujo de aire dentro del equipo. Permiten a los ingenieros diseñar sistemas de refrigeración para optimizar el diseño y reducir el consumo de energía, peso y coste, y verificar que no haya problemas cuando se construya el equipo. La mayoría de softwares de simulación térmica utiliza técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para predecir la temperatura y el flujo de aire de un sistema electrónico [22].

En la primera parte del estudio se realiza un análisis térmico teórico a través del software ANSYS Fluent de dos modelos de luminarias, Modelo A y B. El Modelo A corresponde con una luminaria LED de alta potencia, 200W, con un diseño específico para conseguir unas prestaciones lumínicas adecuadas y una óptima

disipación térmica. Y por otro lado la luminaria Modelo B, con una potencia de 60W, corresponde con la luminaria original manteniendo la carcasa envolvente y donde se ha procedido a la sustitución del interior de la fuente de iluminación de descarga por una fuente con una placa LED y los respectivos dispositivos electrónicos capaces de conseguir las mismas prestaciones luminotécnicas, pero manteniendo la envolvente original de la luminaria. Los resultados teóricos del análisis térmico obtenidos para ambos modelos, donde se observan que en el Modelo A la disipación es muy favorable comparándola con el Modelo B, teniendo en cuenta que en el Modelo A la potencia de entrada es de 200W mientras que en Modelo B es de 60W y utilizando los mismos materiales y mismas condiciones de contorno para las simulaciones, los resultados teóricos obtenidos indican que la disipación del calor del Modelo A es mejor que en el Modelo B, cuya diferencia se encuentra solo en el diseño de los modelos.

Esto nos indica que un buen diseño y una elección de materiales adecuados benefician a todos los componentes de la luminaria y, por consiguiente, tener un buen funcionamiento, durabilidad y eficiencia de los LED debido a la buena disipación de calor. El LED se encuentra en una variación del flujo luminoso y una pérdida de cromaticidad debido a la temperatura alcanzada por encima del límite funcional. Pudiendo este flujo disminuir entre un 20% e incluso un 100%, del mismo modo, la cromaticidad se ve afectada en términos similares. Eleva temperatura de unión del LED afecta a la calidad lumínica y a la vida útil consecuentemente. Cada LED tiene unas propiedades específicas, dependiendo del LED seleccionado para cada luminaria, las propiedades lumínicas, como la eficiencia y la vida útil se encontrarán en un rango favorable para el funcionamiento de una luminaria pero en otra luminaria este mismo LED empeora porque su temperatura de funcionamiento es más baja de la temperatura que se alcanza en la luminaria.

La segunda parte del estudio, donde se han adquirido datos experimentales de 5 luminarias LED de distintas potencias y modelos y en las mismas condiciones de contorno en el laboratorio de luminotécnica con la cámara térmica FLUKE Ti 25,

se indica que efectivamente el diseño es importante debido a la disipación de calor de las luminarias para el efectivo funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

En el momento de favorecer la disipación de calor, el disipador es el componente más importante para reducir la temperatura de unión. La mayoría de los disipadores son diseñados con aletas para aumentar su superficie de contacto con el aire y disipar mayor cantidad de calor [43]. Será necesario mejorar el diseño de los componentes de la luminaria para facilitar la disipación de calor y favorecer el paso del aire a través del disipador de las luminarias para disminuir la temperatura de los dispositivos electrónicos. Para mejorar la refrigeración se pueden incorporar ventilaciones para mejorar el flujo del aire del interior y que pueda ir hacia el exterior.

Un problema importante con las luminarias LED de alta potencia es el calor que se genera en el interior. La distribución de los LED y el efecto del número de LED encendidos afectan a la temperatura de unión y participa fuertemente en la degradación del LED [44]. La mayoría de luminarias contienen disipadores de aluminio como una solución. Actualmente se está investigando materiales con nuevas aleaciones y formulaciones para una efectiva disipación térmica, por ejemplo, se ha desarrollado nitrato de aluminio para aplicarlo como una fina capa en los disipadores que tiene ciertas ventajas sobre los convencionales dieléctricos basados en polímeros o sustratos cerámicos tales como una excelente disipación térmica y una baja resistencia térmica [45]. El tema de la disipación térmica está a la orden del día, se están investigando materiales para ser utilizados como disipadores de calor que fomentan una mayor durabilidad de los LED debido a una mejora de la disipación térmica [46].

Se ha comentado repetidamente durante el estudio que el diseño es un tema importante para la disipación del calor. Los resultados de la simulación del Modelo B, que consiste en el aprovechamiento de la carcasa de las luminarias de descarga instaladas previamente, disminuiría la vida útil de los LED y su eficiencia lumínica en términos de flujo luminoso y cromaticidad no serían los idóneos al encontrarse en temperaturas de unión más altas de las que el fabricante aporta en la hoja de

características incluso siendo una luminaria de una potencia de 60W, debido a que su diseño está enfocada a una luminaria de descarga donde la dirección del calor generado es el haz de luz, siendo por el contrario una conducción del calor generado hacia la parte trasera de los LED y distintos componentes que forman la luminaria.

Debido a lo cual, hay que tener en cuenta que las luminarias de alumbrado público de descarga y donde son sustituidas por tecnología LED, dejando la carcasa de las luminarias previamente instaladas, acaba afectando a los dispositivos electrónicos si no hay buena disipación térmica. Como se ha comentado previamente en este apartado, la utilización de ventilaciones ya sean naturales o forzadas favorecerían a la disipación de calor de los componentes electrónicos.

Los dispositivos electrónicos se ven afectados por las altas temperaturas. Una temperatura de unión de los LED elevada reduce la vida útil, varía la cromaticidad y disminuye el flujo lumínico, reduciendo las propiedades lumínicas.

Para resumir, se han obtenido datos térmicos teóricos a partir de los modelos 3D desarrollados para realizar la batería de simulaciones y se han adquirido datos experimentales de luminarias donde se ha demostrado que la potencia de entrada es el calor que la luminaria genera y dependiendo del diseño y la elección de los materiales de las mismas la temperatura de unión de los LED es más elevada por la poca disipación de calor que se produce en ellas, siendo perjudicial para el buen funcionamiento de los LED, donde se reducen las propiedades lumínicas de las luminarias y disminuyen la vida útil de los dispositivos electrónicos, alrededor de un 20%. La elección de un LED, el cual tiene una temperatura de unión más baja de la que se puede alcanzar en la luminaria, podría disminuir sus propiedades hasta un 100%, convirtiéndose este LED en inservible para lo que corresponde a su funcionamiento.

Un buen diseño de la luminaria donde se favorezca la circulación de aire para el beneficio de la disipación de la temperatura de unión de los LED favorecerá a la

vida útil y mejora la eficiencia y confiabilidad de los LED teniendo mejores propiedades lumínicas. Aparte del diseño, una buena selección de materiales de los componentes de la luminaria donde la conductividad térmica sea elevada favorece a la disipación térmica de la luminaria.

7. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todos los que han contribuido a la finalización exitosa de este proyecto. Me gustaría expresar mi gratitud a mi tutor del trabajo de investigación Dr. Manuel Jesús Hermoso Orzaez por su enorme dedicación y disponibilidad a la hora de realizar este trabajo. A los fabricantes de luminarias por la facilidad de aportar datos sin ningún tipo de problema.

Además, me gustaría agradecer a mi padre y hermano, compañeros de este camino donde han mostrado una innegable paciencia y confianza, y a mi madre, una luz que me guía desde el cielo. A toda mi familia y amigos que no podría estar este trabajo completo sin su apoyo y ánimo incondicional.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Gago-Calderon A, Hermoso-Orzaez MJ, De Andres-Dia JR, Redrado-Salvatierra G. *Evaluation of Uniformity and Glare Improvement with Low Energy Efficiency Losses in Street Lighting LED Luminaires Using Laser-Sintered Polyamide-Based Diffuse Covers*. ENERGIES. 11 (4) 816 (2018). DOI: 10.3390/en11040816.

[2] Hermoso-Orzaez MJ, Rojas-Sola JI, Gago-Calderon A. *Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires*. LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY. 50 (2) (2018) 282 – 293. DOI: 10.1177/1477153516645647.

[3] Hermoso-Orzaez MJ, Diaz JRD. *STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES*. LIGHT & ENGINEERING. 22 (2) (2014) 47 – 58.

[4] ATP Iluminación Catálogo General 2015.

[5] Colaco AM, Kurian CP, Kini SG Colaco SG, Johny C. *Thermal characterization of multicolor LED luminaire*. MICROELECTRONICS RELIABILITY. 78 (2017) 379 – 388. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.04.026.

[6] Chen HT, Tan SC, Hui SY. *Color Variation Reduction of GaN-Based White Light-Emitting Diodes Via Peak-Wavelength Stabilization*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. 29 (7) (2014) 3709 – 3719. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2281812.

[7] Zhang Y, Long ES, Zhang MS. *A New Thermal Interface material: Graphene-epoxy composite used for LED heat dissipation*. CHIANG MAI JOURNAL OF SCIENCE. 45 (6) 2459 – 2470.

[8] Chakravarthii MKD, Devarajan M, Choo CL, Suvindraj K. *Thermal and Optical Performance of LED Mounted on Substrates With Converging-Diverging and Diverging-Converging Channels*. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY. 8 (8) (2018) 1381 – 1390. DOI: 10.1109/TCPMT.2018.2808378.

[9] Keeping S. *Understanding LED Internal Thermal Resistance*. Contributed By Electronic Products, 2015.

- [10] Sun LX, Zhu JX, Wong H. *Simulation and evaluation of the peak temperature in LED light bulb heatsink*. MICROELECTRONICS RELIABILITY. 61 (2016) 140 – 144. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.12.023.
- [11] Shin HW, Jung SB, Lee HS. *Thermal Resistance Analysis of Light-Emitting Diode Modules with Thermal Via Structure*. JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS. 47 (12) (2018) 7323 – 7330. DOI: 10.1007/s11664-018-6672-0.
- [12] Chen YX, Shen GD, Gao ZY, Guo WL, Zhang GC, Han J, Zhu YX. *Relationship between light efficiency and junction temperature of high power AlGaInP light-emitting diode*. ACTA PHYSICA SINICA. 60 (8) (2011) 087206.
- [13] Chen HT, Lin S, Xiong CB. *Analysis and Modeling of Thermal Effect and Optical Characteristic of LED Systems With Parallel Plate-Fin Heatsink*. IEEE PHOTONICS JOURNAL. 9 (2) (8200411) (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2670858.
- [14] Hsieh JC, Lin DTWC, Cheng CH, Kingkaew S. *The optimal design of the thermal spreading on high power LED*. MICROELECTRONICS JOURNAL. 45 (7) (2014) 904 – 909. DOI: 10.1016/j.mejo.2014.03.008.
- [15] Keeping S. *Smart Drivers Control LED Temperature to Solve SSL Thermal Issues*. Contributed By Electronic Products, 2016.
- [16] Hermoso-Orzaez MJ, Rojas-Sola JI, Gago-Calderon A. *Power Quality and Energy Efficiency in the Pre-Evaluation of an Outdoor Lighting Renewal with Light-Emitting Diode Technology: Experimental Study and Amortization Analysis*. ENERGIES. DOI: 10 (7) 836 (2017) 10.3390/en10070836.
- [17] Sokmen KF, Yuruklu E, Yamankaradeniz N. *Computational thermal analysis of cylindrical fin design parameters and a new methodology for defining fin*

structure in LED automobile headlamp cooling applications. APPLIED THERMAL ENGINEERING. 94 (2016) 534 – 542. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.069.

[18] Anithambigai P, Chakravarthii MKD, Mutharasu D, Huong LH, Zahner T, Lacey D, Kamarulazizi I. *Potential thermally conductive alumina filled epoxy composite for thermal management of high power LED*. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS. 28 (1) (2017) 856 – 867. DOI: 10.1007/s10854-016-5600-4.

[19] Jang H, Lee JH, Byon C, Lee BJ. *Innovative analytic and experimental methods for thermal management of SMD-type LED chips*. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER. 124 (2018) 36-35. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.055.

[20] Lu LB, Zhang Z, Guan YC, Zheng HY. *Enhancement of Heat Dissipation by Laser Micro Structuring for LED Module*. POLYMERS. 10 (8) (2018) 886. DOI: 10.3390/polym10080886.

[21] Yu X, Zhang BG, Zhao S, Kao ZX, Yang SH, Liu XY. *Enhancement of heat dissipation in LED using graphene and carbon nanotubes*. ECS JOURNAL OF SOLID STATE SCIENCE AND TECHNOLOGY. 7 (10) (2018) M153 – M160. DOI: 10.1149/2.0091810jss.

[22] Lee DK, Lee JM, Cho MU, Park HJ, Cha YJ, Kim HJ, Kwak JS. *Influence of the thermal conductivity of thermally conductive plastics on the thermal distribution of a light-emitting diode headlight for vehicles*. JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY. 18 (9) (2018) 5904 -5907. DOI: 10.1166/jnn.2018.15587.

[23] Malalasekera W. and Versteeg H. K. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Second Edition. 2007.

[24] Xamán J, Gijón-Rivera M, *Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros*. Ed. Palibrio. Bloomington. Abril, 2016.

[25] Huang DS, Liao YS, Kuo HJ, Kuo FJ, Lin MT. *Simulation of a high-power LED lamp for the evaluation and design of heat dissipation mechanisms*. MICROSYSTEM TECHNOLOGIES-MICRO-AND NANOSYSTEMS-INFORMATION STORAGE AND PROCESSING SYSTEMS. 22 (3) (2016) 523 – 529. DOI: 10.1007/s00542-015-2580-x.

[26] ATP Iluminación catálogo LED Febrero 2018.

[27] Sólydi Catálogo.

[28] Macuzic S, Lukic J, Ruzic D. *Three-Dimensional Simulation of the McPherson Suspension System*. TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE. 25 (5) (2018) (1286 – 1290). DOI: 10.17559/TV-20161215093920.

[29] Nair DV, Ghoshdastidar PS. *A comparative study of 2-D and 3-D conjugate natural convection from a vertical rectangular fin array with multilayered base subjected to distributed high heat flux*. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER. 121 (2018) 1316 – 1334. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.037.

[30] Student Guide Altair University.

[31] Maximum Continuous Service Temperature Values of Several Plastics. Omnexus by EspecialChem.

- [32] OSRAM Datasheet Version 1.5 LUW CQUAR (Streetwhite)
- [33] Cree Datasheet XLamp XP – G3 LED
- [34] Zhou JC, Huang JH, Wang YY, Zhou Z. *Thermal distribution of multiple LED module*. APPLIED THERMAL ENGINEERING. 93 (2016) 122 -130. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.022.
- [35] Vera Coello M, Iglesias Estradé I, Sánchez Pérez A. L, Martínez Bazán C. *Ingeniería fluidomecánica*. Paraninfo. Madrid. 2012.
- [36] *Ansys Fluent 12.0 Theory Guide*.
- [37] *Manual de uso*. Cámara Termográfica Ti25 FLUKE
- [38] Chen HY, Chen CC. *Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer*. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 126 (2016) 130 – 137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.027.
- [39] When CD, Chai TY. *Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and application of multispectral radiation thermometry*. APPLIED THERMAL ENGINEERING. 31 (14 – 15) (2011) 2414 – 2421. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.005.
- [40] Emissivity Coefficients Materials. The Engineering ToolBox.
- [41] Hoja de características Luminaria LH – GL1A de Luminhome Lighting
- [42] Hoja de características Luminaria T1A – 2 – 80 de Luminhome Lighting

[43] Karatekin C, Kokkaya O. *Comparative analysis of different cooling fin types for countering LED luminaires' heat problems*. TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES. 26 (1) (2018) 454 – 466. DOI: 10.3906/elk-1602-121.

[44] Ben Abdelmlek K, Araoud Z, Ghnay R, Abderrazak K, Charrada K, Zissis G. *Effect of thermal conduction path deficiency on thermal properties of LED package*. APPLIED THERMAL ENGINEERING. 102 (2016) 251- 260t. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.100.

[45] Hahn BD, Kim Y, Choi JJ, Ryu JH, Kim JW, Yoon WH, Park DS, Yoon SY, Ma BJ. *Fabrication and characterization of aluminum nitride thick film coated on aluminum substrate for heat dissipation*. CERAMICS INTERNATIONAL. 42 (16) (2016) 18141 – 18147. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.08.128.

[46] Cho EC, Huang JH, Li CP, Chang-Jian CW, Lee KC, Hsiao YS, Huang JH. *Graphene-based thermoplastic composites and their application for LED thermal management*. CARBON. 102 (2016) 66 – 73. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.01.097.

[47] Anderson John D. Jr. *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS The Basics with Applications*. Department of Aerospace Engineering University of Maryland. 1995.

[48] Hambley, Allan R. *Electrónica*. 2ª ed. Pearson Alhambra. Madrid. 2008.

[49] Patankar Suhas. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal science)*. 1980.