



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica
Superior de Jaén

**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO
ÓPTIMO DE TECNOLOGÍAS LED
APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO
MEDIANTE ANÁLISIS TÉRMICO Y DE
CALIDAD DE ENERGÍA**

Autor: Juan de Dios Unión Sánchez

Directores de tesis:

Dr. D. Manuel Jesús Hermoso Orzáez

Dr. D. Blas Ogáyar Fernández

Departamento:

Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente

Fecha: 16/02/2024

ISBN:
Licencia CC

RUJJA



UNIVERSIDAD DE JAÉN
**ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE JAÉN**
**CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA
ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

TESIS DOCTORAL
**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO ÓPTIMO
DE TECNOLOGÍAS LED APLICADAS AL
ALUMBRADO URBANO MEDIANTE ANÁLISIS
TÉRMICO Y DE CALIDAD DE ENERGÍA**

**PRESENTADA POR:
JUAN DE DIOS UNIÓN SÁNCHEZ**

**DIRIGIDA POR:
DR. D. MANUEL JESÚS HERMOSO ORZÁEZ
DR. D. BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ**

JAÉN, FEBRERO 2024
ISBN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO ÓPTIMO
DE TECNOLOGÍAS LED APLICADAS AL
ALUMBRADO URBANO MEDIANTE ANÁLISIS
TÉRMICO Y DE CALIDAD DE ENERGÍA**

**PRESENTADA POR:
JUAN DE DIOS UNIÓN SÁNCHEZ**

**DIRIGIDA POR:
DR.D. MANUEL JESÚS HERMOSO ORZÁEZ
DR.D. BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ**

JAÉN, FEBRERO 2024

ISBN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

**UNIVERSIDAD DE JAÉN
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN**

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada “**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO ÓPTIMO DE TECNOLOGÍAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO MEDIANTE ANÁLISIS TÉRMICO Y DE CALIDAD DE ENERGÍA**”, ha sido desarrollada en el laboratorio de iluminación y domótica del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de Jaén en el marco del contrato realizado por el laboratorio de Integración, Planificación y Gestión Energética dentro del Grupo de Investigación I+D en Ingeniería, Energía y Sostenibilidad englobado en el Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA) de la Universidad de Jaén y presentada por D. Juan de Dios Unión Sánchez, aspirante al grado de Doctor en “Energías Renovables”, bajo la dirección de los doctores D. Manuel Jesús Hermoso Orzáez y D. Blas Ogáyar Fernández.

Jaén, Febrero 2024

El doctorando

Fdo. Juan de Dios Unión Sánchez

Los directores de Tesis

Dr. D. Manuel Jesús Hermoso Orzáez

Dr. D. Blas Ogáyar Fernández



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO ÓPTIMO DE TECNOLOGÍAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO MEDIANTE ANÁLISIS TÉRMICO Y DE CALIDAD DE ENERGÍA

TRIBUNAL EVALUADOR:

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Suplente:

Suplente:

JAÉN, FEBRERO 2024

“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía.
Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia”

ANÓNIMO

ÍNDICE GENERAL

1.	AGRADECIMIENTOS	15
2.	RESUMEN.....	16
3.	ABSTRACT	18
4.	TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES	20
4.1	INTRODUCCIÓN.....	25
4.1.1	PLANTEAMIENTO Y DETERMINACIÓN DE LOS PROBLEMAS A INVESTIGAR	25
4.1.2	ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	27
4.2	OBJETIVOS.....	29
4.3	METODOLOGÍA	31
4.3.1	METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL ESTUDIO DE DISIPACIÓN TÉRMICA	31
4.3.2	METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE DE IRRUPCIÓN O ARRANQUE	38
4.4	RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS.....	45
4.4.1	RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA EN LA CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA ÚTIL DE LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO	45
4.4.2	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE EN LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO MEDIANTE MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO	53
4.5	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	58
4.6	CONCLUSIONES FINALES	65
4.7	REFERENCIAS A CAPÍTULOS DE LIBRO Y COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES	68
4.8	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	77
4.9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
4.10	TRAYECTORIA PROFESIONAL E INVESTIGADORA	86
4.11	COMPENDIO DE PUBLICACIONES Y CERTIFICADOS	90
4.11.1	ARTÍCULOS JCR	90
4.11.2	CAPÍTULOS DE LIBRO Y COMUNICACIONES A CONGRESOS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo para el análisis de la disipación térmica teórica. Fuente: elaboración propia	32
Figura 2 Modelado en 3D de la luminaria Modelo. Fuente: elaboración propia.....	33
Figura 3 Definición de skew. Fuente: Guía de control del mallado HyperMesh	34
Figura 4 Control de malla. Fuente: Guía de control de malla HyperMesh.	34
Figura 5 Modelo discretizado de luminaria. Fuente: elaboración propia a partir del software HyperMesh. ...	34
Figura 6 PCB y diodo LED discretizados. Fuente: elaboración propia a partir del software HyperMesh.....	34
Figura 7 Sección media de los componentes y el aire generados con el Modelo tetraédrico.	34
Figura 8 Esquema de montaje en laboratorio para las mediciones. Fuente: elaboración propia	41
Figura 9 Diagrama de flujo para el análisis de la corriente de irrupción. Fuente: elaboración propia	42
Figura 10 Temperatura Luminaria a 20°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW.....	45
Figura 11 Velocidad del aire a 20°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW.....	46
Figura 12 Temperatura Luminaria a 40°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW.....	46
Figura 13 Velocidad del aire a 40°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW.....	46
Figura 14 Temperatura Luminaria a -10°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW	47
Figura 15 Velocidad del aire a -10°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW	47
Figura 16 Rango de temperaturas de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia	49
Figura 17 Rango de temperaturas de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia	49
Figura 18 Comparación de la disipación del difusor (izquierda) y del disipador (derecha) para distintas temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW	50
Figura 19 Rango de temperaturas del difusor y del disipador respecto a la temperatura ambiente en cada simulación del Modelo. Fuente: cálculos propios	50
Figura 20 Modelo de luminaria LED Aire Serie 7 de ATP Lighting. Fuente: Catálogo de iluminación LED de ATP.....	51
Figura 21 Datos térmicos de la cubierta. Zona azul y verde. Emisividad del plástico 0,92. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke.....	52
Figura 22 Datos térmicos del disipador. Zona roja. Emisividad Aleación de aluminio 0,5. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke.....	53
Figura 23 Datos térmicos del disipador. Zona roja. Emisividad Aleación de aluminio 0,5. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke.....	53
Figura 24 Datos térmicos del difusor. Zona verde. Emisividad del plástico 0,92. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke	53
Figura 25 Peso de la entropía en los procesos de arranque	55
Figura 26 Peso método CRITIC para los procesos de arranque	57
Figura 27 Resumen de las temperaturas de unión de los LED durante la simulación a temperatura ambiente de 40°C. Fuente: elaboración propia.....	59
Figura 28 Variación de la temperatura máxima de unión de los LED con respecto a la temperatura ambiente de la simulación, marcando la temperatura límite de unión de cada LED. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 29 Temperatura de unión de los LED (Tj) frente al flujo luminoso. Fuente: elaboración propia y hoja de datos LED Osram LUW CQAR (streetwhite).....	60
Figura 30 Temperatura de unión (Tj) vs Cambio de coordenadas cromáticas. Fuente: elaboración propia y hoja de datos LED Osram LUW CQAR (streetwhite).....	60
Figura 31 Datos teóricos comparativos (izquierda) y datos experimentales (derecha). Fuente: Elaboración propia a partir del software Hyperview y SmartView 4.1.....	61
Figura 32 Comparativa de pesos en procesos de arranque	62
Figura 33 Comparación de la corriente de arranque.....	63
Figura 34 Predicción de corriente de irrupción.....	64
Figura 35 Comparación de la evolución de la temperatura máxima de las luminarias.....	73
Figura 36 Gráfico de potencia en función de la temperatura de disipación	74
Figura 37 Capítulo de libro IntechOpen.....	86
Figura 38 Pertenencia al grupo de investigación GIDIES de la UJA	88
Figura 39 Trayectoria académica e investigadora. Fuente: elaboración propia	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos capítulo libro previo al doctorado. Fuente: IntechOpen	20
Tabla 2 Datos Revista IJERPH. Fuente: Clarivate WOS	21
Tabla 3 Datos Revista LEUKOS. Fuente: Clarivate WOS	22
Tabla 4 Datos capítulo de libro ICOWEFS 2022. Fuente: SPRINGER.....	23
Tabla 5 Datos capítulo de libro ICPME2022. Fuente: AEIPRO	24
Tabla 6 Datos capítulo de libro ICPME2024. Fuente: AEIPRO	24
Tabla 7 Componentes, materiales y potencias. Fuente: ATP iluminación S.A	33
Tabla 8 Propiedades de los materiales del modelo. Fuente: catálogo ATP	35
Tabla 9 Tabla de especificaciones del analizador de red. Fuente: Manual Fluke	38
Tabla 10 Especificaciones de la sonda de corriente. Fuente: Manual Fluke	39
Tabla 11 Tabla de especificaciones del driver LED Inventronics de 60 W. Fuente: Inventronics	39
Tabla 12 Tabla de especificaciones del driver LED Inventronics 85W. Fuente: Inventronics	40
Tabla 13 Tabla de especificaciones del driver LEDSTREET4. Fuente: Philips.....	40
Tabla 14 Tabla de especificaciones del controlador LED LPFH-60D-24. Fuente: Meanwell	40
Tabla 15 Tabla de especificaciones del driver LED LCO SNC2. Fuente: TRIDONIC	41
Tabla 16 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a 20°C. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 17 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a 40°C. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 18 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a -10°C. Fuente: Elaboración propia	48
Tabla 19 Tabla de potencia de la luminaria. Fuente: Datos del fabricante	51
Tabla 20 Características del driver LED. Fuente: Datos del fabricante	51
Tabla 21 Tabla de especificaciones de la cámara termográfica. Fuente: Manual FLUKE	52
Tabla 22 Matriz de decisión.....	54
Tabla 23 Matriz de decisión normalizada	54
Tabla 24 Valor de entropía	54
Tabla 25 Concepto de entropía basado en el peso objetivo	54
Tabla 26 Corriente de irrupción mediante método de entropía.....	55
Tabla 27 Matriz de decisión normalizada	55
Tabla 28 Desviación típica de cada proceso de arranque	56
Tabla 29 Matriz de correlación de coeficientes r_{jk}	56
Tabla 30 Matriz de conflictos	56
Tabla 31 Pesos objetivos.....	57
Tabla 32 Corriente de irrupción mediante método CRITIC	58
Tabla 33 Temperaturas de unión de los LED obtenidas en las simulaciones (T_j). Fuente: elaboración propia	58
Tabla 34 Corriente de arranque Entropía vs método CRITIC	63
Tabla 35 Predicción final corriente de irrupción	64
Tabla 36 Tabla de especificaciones técnicas luminarias urbanas ensayadas.....	68
Tabla 37 Comparación de la corriente de arranque media.	69
Tabla 38 Distorsión armónica total media (THD)	70
Tabla 39 Tabla de especificaciones técnicas de luminarias	72
Tabla 40 Cuadro resumen de las temperaturas máximas de cada luminaria.....	74
Tabla 41 Comparación de las coordenadas de cromaticidad por efecto de la temperatura máxima	75

1. AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis doctoral. Su apoyo incondicional, conocimientos y ánimos han sido fundamentales en mi camino hacia la consecución de este logro académico.

En primer lugar, y como no podía ser de otra manera, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de Tesis. Su trabajo, dedicación, experiencia y comprensión han sido invaluable a lo largo de todo este proceso de investigación.

Especial reconocimiento merece Manuel J. Hermoso, por su infinita paciencia e implicación y por iniciarme en el mundo de la investigación allá por el año 2019, en mi etapa final como estudiante del Máster en Ingeniería Industrial, cuando dirigió mi trabajo fin de máster. Aún recuerdo una conversación, en la que me animaba a realizar la tesis doctoral con unas cariñosas palabras sobre mis cualidades investigadoras. Su profundo conocimiento, experiencia y forma de ser han sido una fuente constante de inspiración y motivación. Gracias a su orientación, he crecido como investigador y he desarrollado una comprensión más profunda de mi área de estudio.

En segundo lugar, me gustaría agradecer al laboratorio de integración y planificación del Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente, al Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, al Departamento de Ingeniería Eléctrica y a mi grupo de investigación “I+D en Ingeniería, Energía y Sostenibilidad” de la Universidad de Jaén, por su generoso apoyo financiero. Sin su respaldo, este proyecto no habría sido posible. Su inversión en la investigación académica es crucial para el avance del conocimiento y el progreso de la sociedad en su conjunto.

También me gustaría reconocer al laboratorio de Iluminación y Domótica de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, por su ayuda prestada para realizar los ensayos y test necesarios para realizar esta investigación, así como agradecer la oportunidad de haber utilizado sus equipos de medida y dispositivos de ensayo con los que se ha realizado la investigación, dando fruto a la presente tesis doctoral.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. Su amor incondicional, paciencia y comprensión han sido el pilar fundamental en mi vida. A mis padres, gracias por siempre creer en mí y alentarme a perseguir mis sueños. A mi hermano, tía, abuela y primos, gracias por estar en todos aquellos momentos de dificultad y desánimo. A mi pareja, sufridora de mis idas y venidas, del tiempo robado y sin cuyo apoyo moral hubiera sido imposible la culminación de este proyecto. A mi familia política gracias por su apoyo constante y mensajes de ánimo.

En resumen, este logro tan importante no hubiera sido posible sin el apoyo de cada uno de ellos.

A todos muchas gracias

2. RESUMEN

En la presente tesis doctoral se va a realizar una investigación de dos problemas planteados en relación con luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano. A pesar de ser una tecnología eficiente tanto en términos energéticos como económicos, presenta una serie de problemas relacionados con la disipación y la calidad de energía que serán presentados en el desarrollo del presente compendio.

El primer artículo del compendio, trató el tema de la disipación térmica de luminarias LED y cómo afecta ésta a la calidad lumínica y a la vida útil. La disipación térmica, se define generalmente, como un proceso de transferencia de calor desde un cuerpo caliente a un cuerpo frío. En iluminación LED aplicada al alumbrado urbano, este fenómeno adquiere capital importancia, debido a la cantidad de calor que se genera en el interior de cada una de las luminarias por su arquitectura electrónica, así como por su fuente de luz. La parte electrónica está compuesta por fuente de alimentación o driver que es el encargado de proporcionar la tensión y corriente necesarias para un óptimo funcionamiento de LED. Entrando más en detalle, el driver consta de un convertidor AC/DC y un convertidor DC/DC, que se encargan de rectificar la forma de onda de la tensión de alimentación (220V, 50Hz) mediante un puente de diodos y un condensador, y por otro lado el conversor DC/DC proporcionará intensidad de corriente constante en el rango de funcionamiento de los diodos emisores de luz. Esto conllevará a la generación de la mayor parte de calor que se produce en el interior de una luminaria.

Además, la fuente de luz LED utilizada para su construcción, posee un parámetro muy importante que se denomina Temperatura de unión T_j (Junction Temperature) y se define como la temperatura de funcionamiento más alta de un diodo emisor de luz. Este fenómeno de la temperatura de unión está ligada a las coordenadas de color (CIE 1931 XY) y al flujo luminoso de los diodos emisores de luz.

En el presente artículo se ha realizado una simulación con un software de elementos finitos, como se produciría la disipación térmica de una luminaria real en diferentes condiciones de contorno y cómo afecta esta disipación a los parámetros expuestos anteriormente como la variación en las coordenadas de color y en el flujo luminoso. Posteriormente, se validaron los resultados de forma experimental por medio de una cámara termográfica.

En el segundo artículo de la presente tesis doctoral se investigó sobre el área de calidad de energía y concretamente sobre un fenómeno denominado corriente de irrupción. Ésta se define como la corriente de entrada instantánea máxima consumida por un dispositivo eléctrico o electrónico cuando se encienden por primera vez y que puede superar en varias veces a la corriente nominal del dispositivo en cuestión. Según en qué estado se encuentren los condensadores que componen la arquitectura de las luminarias LED (cargados o descargados), este fenómeno es estocástico. Actualmente no existe un procedimiento para una estimación de la corriente de irrupción en luminarias urbanas. En el presente estudio se propone una metodología novedosa para la estimación de la corriente de irrupción basada en métodos de toma de decisiones multicriterio. Estos métodos se definen como una metodología para evaluar alternativas según criterios individuales y combinarlos en una evaluación general.

En este trabajo se ha realizado la evaluación de la corriente de irrupción mediante la combinación de dos métodos de decisión multicriterio como son el método de la entropía y CRITIC de una familia de luminarias LED de diferente año de producción. La combinación de ambos métodos ha permitido tener una herramienta de estimación de

la corriente de irrupción más precisa antes de que las luminarias sean montadas en los circuitos y poder dimensionar de una forma adecuada los elementos de eléctricos de control y producir importantes ahorros económicos.

Por otro lado, aparte de los artículos JCR, se han realizado dos aportaciones a Congresos Internacionales a través de capítulos de libro en las Actas de las Conferencias.

En el primer capítulo de libro y comunicación a Congreso Internacional, al igual que el segundo artículo del compendio, se centró en el área de calidad de energía y se realizó un estudio comparativo de la corriente de irrupción y de la generación de armónicos. La novedad de este capítulo de libro es que se estudian las luminarias con tecnología de descarga (Halogenuro Metálico y Vapor de Sodio de Alta Presión) junto con luminarias LED pues se realizaban sustituciones masivas a gran escala del alumbrado público en España sin tener en cuenta la diferencias entre ambos tipos de tecnología y por lo tanto las consecuencias eléctricas que podrían afectar a los elementos de control de los circuitos donde se conectan las luminarias.

El objetivo de este trabajo es estudiar y comparar los dos parámetros clave expuestos anteriormente, como la corriente de irrupción y la generación de armónicos en ambas luminarias de alumbrado público. Este estudio comparativo dará una idea de la magnitud de estos fenómenos y las diferencias de funcionamiento con la intención de evitar posibles problemas asociados a la corriente de irrupción y a la generación de armónicos como puede ser el sobrecalentamiento de conductores y la protección contra sobretensiones y sobreintensidades.

El último documento del compendio y también capítulo de libro y comunicación a Congreso Internacional, trató nuevamente al igual que el primer artículo, el tema de la disipación térmica. En este trabajo se realizó un estudio comparativo de la disipación térmica de luminarias LED comparándolas con las luminarias de descarga. Se realizó un estudio simulando condiciones reales de funcionamiento, es decir, se analizaron las luminarias a temperatura ambiente, en una habitación sin luz exterior y durante 8h de funcionamiento por medio de una cámara termográfica. Los datos se tomaron periódicamente, hasta que la temperatura se mantuvo estable desde su conexión a la red eléctrica.

El principal objetivo de este trabajo es analizar si se produce una disipación térmica segura, es decir, que la temperatura máxima de disipación no supere la temperatura límite del material más restrictivo del que está compuesto cada una de las luminarias estudiadas.

La disipación térmica es un tema de tendencia en iluminación pues se busca desarrollar nuevos materiales que favorezcan la disipación en las iluminarias y por consiguiente alargar la vida útil de éstas.

3. ABSTRACT

In this doctoral thesis, an investigation of two problems related to LED luminaires applied to urban lighting will be carried out. Despite of being an efficient technology both in energy and economic terms, it presents a series of problems related to dissipation and power quality that will be presented in the development of this compendium.

The first article of the compendium dealt with the thermal dissipation of LED luminaires and how it affects light quality and lifetime. Heat dissipation is generally defined as a process of heat transfer from a hot body to a cold body. In LED lighting applied to urban lighting, this phenomenon is of paramount importance due to the amount of heat generated inside each luminaire by its electronic architecture as well as its light source. The electronic part is composed of the power supply or driver, which is responsible for providing the voltage and current necessary for optimum LED operation. Going into more detail, the driver consists of an AC/DC converter and a DC/DC converter, which are responsible for rectifying the waveform of the supply voltage (220V, 50Hz) by means of a diode bridge and a capacitor, and on the other hand the DC/DC converter will provide constant current intensity in the operating range of the light emitting diodes. This will lead to the generation of most of the heat that is produced inside a luminaire.

In addition, the LED light source used for its construction has a very important parameter called Junction Temperature (T_j), which is defined as the highest operating temperature of a light emitting diode. This junction temperature phenomenon is linked to the colour coordinates (CIE 1931 XY) and the luminous flux of the light emitting diodes.

In this paper, a simulation has been carried out with finite element software, how the thermal dissipation of a real luminaire would occur in different boundary conditions and how this dissipation affects the parameters exposed above as the variation in the colour coordinates and in the luminous flux. Subsequently, the results were validated experimentally by means of a thermographic camera.

In the second article of this doctoral thesis, research was conducted in the area of power quality and specifically on a phenomenon called inrush current. This is defined as the maximum instantaneous inrush current consumed by an electrical or electronic device when it is first switched on, which can exceed the rated current of the device in question by several times. Depending on the state of the capacitors that make up the architecture of LED luminaires (charged or discharged), this phenomenon is stochastic. There is currently no procedure for estimating the inrush current in urban luminaires. In the present study, a novel methodology for inrush current estimation based on multi-criteria decision-making methods is proposed. These methods are defined as a methodology for evaluating alternatives according to individual criteria and combining them into an overall evaluation.

In this work, the inrush current has been evaluated by combining two multi-criteria decision methods such as the entropy method and CRITIC for a family of LED luminaires of different years of production. The combination of both methods has allowed to have a more accurate inrush current estimation tool before the luminaires are mounted in the circuits and to be able to adequately dimension the electrical control elements and produce significant economic savings.

On the other hand, apart from the JCR articles, two contributions have been made to International Congress through book chapters in the Conference Proceedings.

The first Book Chapter and communication to International Congress, like the second article in the compendium, focused on the area of power quality and made a comparative study of inrush current and harmonic generation. The novelty of this book chapter is that luminaires with discharge technology (Metal Halide and High-Pressure Sodium Vapor) are studied together with LED luminaires since massive large-scale replacements of public lighting in Spain were carried out without taking into account the differences between both types of technology and therefore the electrical consequences that could affect the control elements of the circuits where the luminaires are connected.

The objective of this work is to study and compare the two key parameters exposed above, such as inrush current and harmonic generation in both street lighting luminaires. This comparative study will give an idea of the magnitude of these phenomena and the differences in operation with the intention of avoiding possible problems associated with inrush current and harmonic generation such as overheating of conductors and protection against overvoltage and overcurrent.

The last document of the compendium and also Book Chapter and communication to International Congress, dealt again, as the first article, with the subject of thermal dissipation. In this paper, a comparative study of the thermal dissipation of LED luminaires was carried out, comparing them with discharge luminaires. A study was carried out simulating real operating conditions, the luminaires were analysed at room temperature, in a room without external light and during 8 hours of operation by means of a thermographic camera. The data were taken periodically, until the temperature remained stable from its connection to the mains.

The main objective of this work is to analyse if a safe thermal dissipation occurs and that the maximum dissipation temperature does not exceed the limit temperature of the most restrictive material of which each of the luminaires studied is composed.

Thermal dissipation is a trending topic in lighting, as new materials are being developed that favour dissipation in lighting fixtures and, consequently, extend their useful life.

4. TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES

La presente Tesis Doctoral se presenta como compendio de cuatro publicaciones científicas, resultado de los estudios experimentales de disipación térmica y calidad de energía de iluminación aplicada al alumbrado urbano. Este trabajo de tesis se presenta como compendio con el visto bueno de los directores Dr. D. Manuel Jesús Hermoso Orzáez y Dr. D. Blas Ogáyar Fernández.

Los estudios experimentales dieron lugar a la publicación de dos artículos publicados en revistas de alto impacto indexadas en el ISI Journal Citation Reports Science Edition de la Web of Science (WoS) y dos capítulos de libro en Actas de Congresos Internacionales, indexados en Scopus, publicados posteriormente a la fecha de inicio de los estudios de doctorado con fecha 13 de abril de 2021 y que se detallan a continuación.

- **Previo al Doctorado**

La línea de investigación de la presente tesis doctoral parte del Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Industrial y que da lugar a un capítulo de libro titulado “**The Thermal Dissipation of LED Outdoor Lighting Luminaires: Comparative Analysis for a Real Case of Study**” publicado en la editorial IntechOpen el día 25 de marzo de 2020, previo al inicio de los estudios de Doctorado.

Capítulo de Libro IntechOpen

Hermoso-Orzáez Manuel Jesús, Hervás-Pulido Manuel Jesús, **Unión-Sánchez Juan de Dios**, Ogáyar-Fernández Blas and Gago-Calderón Alfonso. The Thermal Dissipation of LED Outdoor Lighting Luminaires: Comparative Analysis for a Real Case of Study, IntechOpen, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91400>



Editorial: IntechOpen
Libro: Energy Efficiency and Sustainable Lighting - a Bet for the Future
Capítulo: The Thermal Dissipation of LED Outdoor Lighting Luminaires: Comparative Analysis for a Real Case of Study
Estado: Publicado (25 marzo 2020)
DOI: dx.doi.org/10.5772/intechopen.91400

Tabla 1 Datos capítulo libro previo al doctorado. Fuente: IntechOpen

- **Compendio Tesis Doctoral**

Artículo 1

Unión-Sánchez, J. de D.; Hermoso-Orzáez, M.J.; Hervás-Pulido, M.J.; Ogáyar-Fernández, B. Impact of Thermal Dissipation on the Lighting Performance and Useful Life of LED Luminaires Applied to Urban Lighting: A Case Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, doi:10.3390/ijerph19020752.



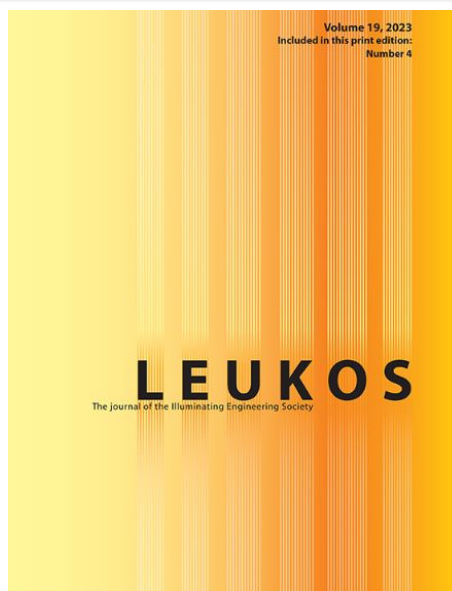
International Journal of
*Environmental Research
and Public Health*

Editorial: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)		
Revista: IJERPH		
Estado: Publicado (10 enero 2022)		
Factor de Impacto: 2,468		
Factor de Impacto (5 años): 2,948		
Categoría JCR	Ranking	Cuartil
ENVIRONMENTAL SCIENCES <i>in SCIE edition</i>	112/251	Q2
PUBLIC, ENVIRONMENTAL & OCCUPATIONAL HEALTH <i>in SCIE edition</i>	67/186	Q2
PUBLIC, ENVIRONMENTAL & OCCUPATIONAL HEALTH <i>in SSCI edition</i>	38/164	Q1

Tabla 2 Datos Revista IJERPH. Fuente: Clarivate WOS

Artículo 2

Juan de Dios Unión-Sánchez, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez, Blas Ogáyar-Fernández and Julio Terrados-Cepeda (2023): Evaluation of Inrush Current in LED Luminaires Applied to Urban Lighting Based on Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study, LEUKOS, DOI: 10.1080/15502724.2023.2240532

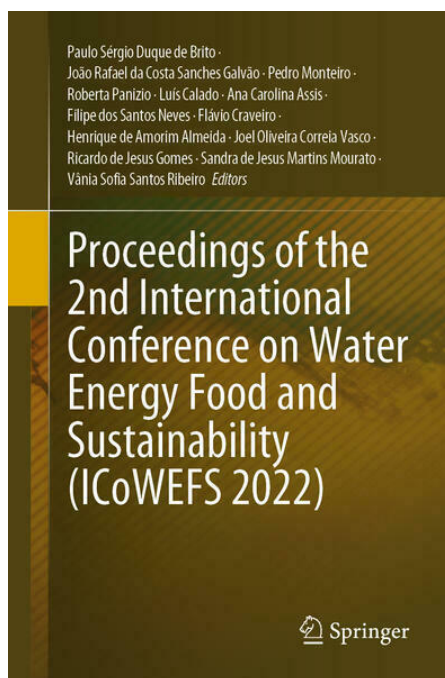


Editorial: Taylor & Francis Inc.		
Revista: LEUKOS		
Estado: Publicado (11 noviembre 2023)		
Factor de Impacto: 3,6		
Factor de Impacto (5 años): 3,4		
Categoría JCR	Ranking	Cuartil
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY <i>in SCIE edition</i>	27/68	Q2
OPTICS <i>in SCIE edition</i>	31/100	Q2

Tabla 3 Datos Revista LEUKOS. Fuente: Clarivate WOS

Capítulo de Libro Actas Congreso Internacional ICoWEFS 2022

Unión-Sánchez, J.d.D., Hermoso-Orzáez, M.J., Terrados-Cepeda, J., Ogáyar-Fernández, B. (2023). Comparative Analysis of Inrush Current and Harmonic Generation in the Replacement of Incandescent Lamps by LED Luminaires in Urban Lighting. In: Duque de Brito, P.S., et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2022). ICoWEFS 2022. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_12



Editorial: Springer
Congreso: ICoWEFS 2022
Estado: Publicado (27 febrero 2023)
Print ISBN: 978-3-031-26848-9
Online ISBN: 978-3-031-26849-6
DOI: doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_12

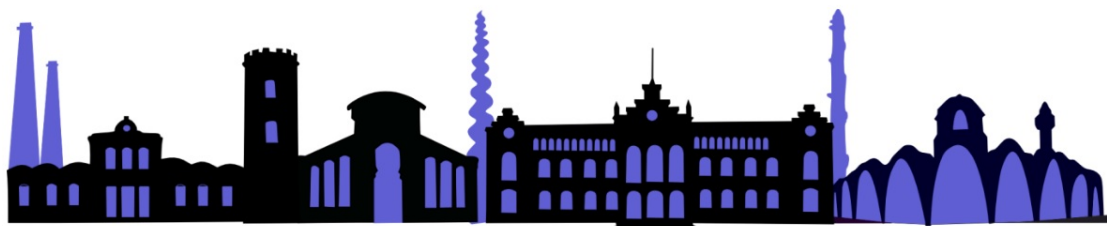
Tabla 4 Datos capítulo de libro ICOWEFS 2022. Fuente: SPRINGER

Capítulo de Libro Actas Congreso Internacional AEIPRO 2022

Unión-Sánchez, J.d.D., Hermoso-Orzáez, M.J., Terrados-Cepeda, J., Ogáyar-Fernández, B. Effects of thermal dissipation on light quality and useful life of LED discharge luminaires. In *Proceedings of XXVI International Congress on Project Management and Engineering (Terrassa, 2022)*. AEIPRO 2022.
<http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/3249>

26th INTERNATIONAL CONGRESS ON PROJECT
MANAGEMENT AND ENGINEERING

Terrassa, 5 – 8 July 2022



Congreso: AEIPRO 2022
Estado: Publicado (10 septiembre 2022)
ISBN: 978-84-09-44521-9
ISSN: 2695-5067
URL: http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/3249

Tabla 5 Datos capítulo de libro ICPME2022. Fuente: AEIPRO

- **En proceso de revisión**

Actualmente, se ha aceptado un resumen con fecha de 4 de febrero de 2024, titulado “**An innovative methodology for the assessment of energy quality in road lighting installations with LED luminaires: A case study**” en el Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos, que se celebrará en la Universidad de Jaén los días 3 y 4 de julio de 2024.

28th INTERNATIONAL CONGRESS ON PROJECT MANAGEMENT AND ENGINEERING

Jaén (Spain), 3 - 4 July 2024



Congreso: AEIPRO 2024
Estado: Resumen aceptado (4 de febrero 2024)
URL: https://congresos.aepro.com/

Tabla 6 Datos capítulo de libro ICPME2024. Fuente: AEIPRO

El presente compendio cumple con los requisitos mínimos marcados en el Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén conforme al capítulo II, artículo 25, epígrafe 2. Aprobado por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Jaén el 6 de febrero de 2012 y modificado por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Jaén de fecha 18 de febrero de 2019.

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado de introducción de la tesis doctoral se expondrán los motivos para trabajar en la presente línea de investigación relacionada con la tecnología LED aplicada al alumbrado urbano. El trabajo de investigación realizado se presenta como compendio de artículos científicos y capítulos de libro para optar al título de Doctor en Energías Renovables por la Universidad de Jaén.

4.1.1 PLANTEAMIENTO Y DETERMINACIÓN DE LOS PROBLEMAS A INVESTIGAR

En la actualidad, la tecnología LED es una forma de iluminación consolidada en nuestras ciudades y hogares. Su rendimiento lumínico, durabilidad, eficiencia energética y luminosidad, junto con el ahorro económico que su uso implica, han desplazado a otras formas clásicas de iluminación, como las tecnologías de iluminación basadas en descarga como Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP) o Halogenuros Metálicos (HM).

Sin embargo, a pesar de las grandes ventajas que presenta el uso de la iluminación LED, se han presentado algunos problemas asociados a la durabilidad de los equipos relacionados con los problemas de disipación térmica y alta temperatura que acaban afectando a su flujo luminoso, así como a sus coordenadas cromáticas.

La construcción o diseño de este tipo de luminarias conlleva el montaje de un gran número de componentes electrónicos para adaptar los niveles de corriente alterna a niveles de corriente continua necesarios para un correcto funcionamiento de los diodos emisores de luz. Estos componentes electrónicos rectifican la corriente alterna y la convierten en corriente continua provocando una gran disipación de calor en el interior de la luminaria que debe ser disipada hacia el exterior.

Esta generación de calor afecta de forma directa a un parámetro clave en el rendimiento del LED que es la temperatura de unión T_j . Esta temperatura de unión está relacionada de forma inversa con la calidad lumínica y vida útil de estos semiconductores. Es por ello que desarrollo de eficientes sistemas de disipación térmica en luminarias urbanas se entiende como un parámetro clave en su construcción.

Además, son muchos los estudios que demuestran una relación directa entre la baja calidad de la iluminación LED y el envejecimiento de los equipos o su sobrecalentamiento, observando la depreciación de la intensidad de la luz y el rendimiento cromático visual que puede afectar a la salud de los usuarios alterando los ritmos circadianos.

Por otro lado, el acortamiento de la vida útil de las luminarias debido al estrés térmico tiene un impacto directo en el ACV (Análisis del Ciclo de Vida) y su impacto medioambiental, que indirectamente afecta a la salud humana.

Para solventar este problema se propone una metodología basada en la simulación de la disipación térmica de luminarias LED basada en elementos finitos con el fin de obtener en la fase de diseño de la luminaria, el comportamiento térmico y cómo afecta

a la temperatura de unión y por consiguiente su impacto en calidad lumínica, mediante la alteración de las coordenadas cromáticas y la reducción del flujo lumínico.

(Artículo 1: Impact of Thermal Dissipation on the Lighting Performance and Useful Life of LED Luminaires Applied to Urban Lighting: A Case Study).

Como se ha comentado anteriormente en los últimos años se ha producido en las ciudades una renovación progresiva del alumbrado público, pasando de lámparas de tecnología de descarga como Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP) y halogenuros metálicos (HM) a luminarias LED.

Esta renovación se ha realizado a gran escala sustituyendo unas luminarias por otras sin tener en cuenta otros elementos del circuito.

El componente electrónico principal de una luminaria LED es el driver que está compuesto principalmente por un convertidor AC-DC y un convertidor DC-DC, que son los encargados de regular la corriente de entrada a los LED para su correcto encendido, considerándose considerada una carga capacitiva por el número de condensadores necesarios para su funcionamiento. Además, por su arquitectura electrónica interna el conversor DC-DC y cuando se conecta una carga capacitiva en su etapa de salida, como en este caso una luminaria LED, se crea un fenómeno físico llamado corriente de irrupción o corriente de arranque.

Las luminarias LED, cuando se conectan en grandes circuitos como es en el caso de alumbrado vial, generan grandes corrientes de irrupción que pueden superar varias veces el valor de la corriente nominal en el proceso de encendido.

A diferencia de lo que ocurre con la tecnología LED, las luminarias de descarga no sufrían este problema, debido a que el número de componentes electrónicos era más reducido y por lo tanto la configuración de los elementos del sistema, como conductores y elementos de mando es diferente, basada en determinadas condiciones de corriente de arranque.

Este fenómeno eléctrico es un problema básico a resolver cuando se planifica una renovación del alumbrado público con luminarias LED, ya que es imprescindible disponer de una estimación previa de la corriente de irrupción generada por las luminarias para un correcto dimensionamiento de los elementos de protección del circuito.

Para solucionar este problema se propone una metodología estadística de la predicción de corriente de arranque o irrupción basada en métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), combinando el análisis de entropía (entropy) y el análisis de la importancia de los criterios mediante la correlación entre ellos (CRITIC), con el fin de obtener una predicción útil de la corriente de arranque en las luminarias LED, en la fase de diseño de los circuitos eléctricos donde irán posteriormente conectadas.

(Artículo 2: Evaluation of Inrush Current in LED Luminaires Applied to Urban Lighting Based on Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study)

4.1.2 ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

- Disipación térmica y vida útil (Artículo 1)

En la actualidad, el ahorro energético en el alumbrado público está generando un gran interés y se ha convertido en una prioridad en la gestión del alumbrado exterior de nuestras ciudades; por este motivo, las luminarias LED son cada vez más frecuentes [1].

Existen estudios relacionados con la disipación térmica de los LED aplicados a la iluminación de automóviles que demuestran sistemáticamente que las propiedades de los materiales de la interfaz térmica, como la resistencia térmica, afectan a las propiedades ópticas de la luminaria [2]. Otros estudios demuestran la pérdida de cromaticidad y la degradación de la luz, el cambio de cromaticidad y la pérdida de transmitancia probados en fósforo diodos emisores de luz blanca convertidos a fósforo (PC-WLED) en ensayos térmicos acelerados a 150°C, 200°C y 250°C [3].

Por otra parte, el creciente uso de luces LED ha modificado drásticamente el entorno de luz natural, planteando nuevos retos tanto para los seres humanos como para la fauna. De hecho, varios estudios biomédicos han relacionado la luz artificial nocturna a la alteración de los ritmos circadianos [4], con importantes consecuencias para la salud humana, de síndromes metabólicos [5], cáncer [6] y reducción de la inmunidad [7]. En este sentido, hay muchos estudios que muestran claramente los efectos adversos de una iluminación deficiente sobre la salud, incluida la depreciación lumínica como consecuencia del deterioro disipación térmica defectuosa, o la devaluación de la intensidad luminosa y la cromaticidad de la luminaria [8,9].

La cromaticidad, las propiedades eléctricas y las propiedades térmicas de los dispositivos LED son altamente dependientes entre sí [10]; por lo tanto, la disipación del calor desempeña un papel importante en la mejora de la eficiencia y la fiabilidad de la iluminación LED [11]. Las deficiencias en iluminación artificial, la pérdida de intensidad de la luz o los cambios de cromaticidad pueden tener serias consecuencias en la salud humana en relación con los ritmos circadianos [12,13]. Por eso es sumamente importante instalar equipos de iluminación exterior energéticamente eficientes, pero que tengan, al mismo tiempo, un bajo impacto en la salud humana [14,15]. Las longitudes de onda más cortas de la luz perturban preferentemente la secreción de melatonina y provocan cambios en la fase circadiana, aunque la luz no sea intensa [13].

La principal fuente de calor en un LED proviene de la unión entre el material semiconductor de tipo p y el material semiconductor de tipo n que compone el dispositivo [16]. Los LED dispersan el 45% de la energía aplicada en luz y el 55% restante en calor. Los chips de alta potencia cada vez emiten más calor, lo que provoca una degradación del rendimiento [17] y, en última instancia, se traduce en una menor esperanza de vida de los productos LED. Por ello, la industria está investigando estructuras de diseño de productos para controlar el calor generado por los chips LED de alta potencia [18].

La temperatura alcanzada en la unión p-n se denomina temperatura de unión (T_j) y se considera un parámetro clave en el rendimiento de los LED [19]. La temperatura de unión a la que deben funcionar los diodos emisores de luz debe ser baja, ya que existe una relación inversa entre la temperatura de unión y la vida útil del LED [20].

La resistencia térmica interna y la temperatura de unión (T_j) son los parámetros críticos de los LED, que deben mantenerse en los niveles nominales para un funcionamiento fiable y robusto [21].

Para un conjunto dado de condiciones de funcionamiento, un ingeniero puede calcular la temperatura de unión de un LED [22] y diseñar un sistema de disipación térmica para reducir la temperatura de los dispositivos electrónicos y prolongar la vida útil de los LED [23].

Los chips modernos se diseñan con tubos de calor conductores 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 (placa de circuito impreso) y/o el disipador de calor independiente.

- *Calidad de energía y corriente de irrupción (Artículo 2)*

Las luminarias de diodos emisores de luz (LED) son una forma bien establecida de iluminación urbana debido a su ahorro económico y eficiencia energética [24][25][26]. Las luminarias LED se componen principalmente de un dispositivo electrónico denominado driver, que se encarga de regular la corriente y la tensión de entrada de los LED para mantenerlos dentro de su rango óptimo de funcionamiento [27][28]. Este dispositivo tendrá un gran impacto en el proceso de encendido de la lámpara debido al diseño de su arquitectura electrónica. Para aplicaciones de iluminación exterior, los drivers de LED se basan en elementos pasivos que conforman las arquitecturas de los convertidores AC/DC y DC/DC [29][30]. El elemento clave del driver es el convertidor DC/DC. Una luminaria LED se considera una carga capacitiva debido al número de condensadores necesarios para la acumulación de energía. Cuando un convertidor DC/DC arranca con una carga capacitiva conectada se crea el problema de la corriente de irrupción en la etapa de encendido [31][32].

La corriente de irrupción es la corriente instantánea máxima que consume un dispositivo eléctrico cuando se enciende por primera vez [33]. La duración de esta corriente es de 2 ms y puede superar en más de 100 veces la corriente nominal del sistema [34][35]. Esta duración y amplitud tienen influencias negativas, como daños en interruptores, cables, conectores y otras partes de la instalación [36].

Existen diferentes estudios relacionados con la predicción y medición de la corriente de irrupción en distintos campos de la ingeniería. El primer estudio muestra esta cuestión, en transformadores eléctricos como un problema clave en la protección de transformadores [37]. Se basan en el uso de un transductor óptico de corriente para modelar matemáticamente la forma de onda y obtener un conocimiento exhaustivo de los parámetros de la corriente de irrupción [38]. El segundo estudio analiza la idea de diseño, la construcción del prototipo de montaje de medida y la verificación experimental de un banco de pruebas automatizado para la identificación de la corriente de irrupción en transformadores [39].

Además de los estudios sobre la medida de la corriente de irrupción, existen algunos estudios que analizan los efectos negativos que puede tener la corriente de irrupción si no se tiene en cuenta en el correcto dimensionamiento de los componentes del sistema,

por ejemplo en la industria del automóvil, concretamente en el uso de lámparas halógenas, donde se ha demostrado que la corriente de irrupción generada al encender una lámpara es el principal estrés que acorta la vida útil de la lámpara [40][41]. Siguiendo también en el campo de los transformadores eléctricos, se ha demostrado que estas corrientes tienen efectos indeseables, incluyendo daños potenciales en el transformador, reducción de la calidad de la energía en el sistema y mal funcionamiento de los relés [42][43].

Debido a los efectos negativos que puede producir la corriente de irrupción, como se ha mencionado en los estudios anteriores, se ha estudiado la forma de limitar la corriente [44]. Existen diferentes elementos en los que se ha centrado la limitación de la corriente de irrupción, en primer lugar es el convertidor AC/DC, intentando limitar paso a paso la corriente de irrupción de los condensadores utilizados en la arquitectura electrónica [45][46] y utilizando un corrector del factor de potencia convencional, un circuito auxiliar y un transistor MOSFET adicional, que se conecta en serie con el condensador del PFC [47], en segundo lugar en el convertidor DC/DC donde se presenta el mecanismo de arranque suave propuesto para limitar la corriente de irrupción de entrada [48]. La idea detrás del mecanismo de arranque suave implica la omisión de los pulsos de reloj de una bomba de carga, que se utiliza para accionar la puerta de un interruptor MOSFET en la ruta de entrada del convertidor [49].

La corriente de irrupción puede limitarse, pero no eliminarse. En esta situación, la estimación aproximada del valor de esta corriente cobra gran importancia en el control eficiente de este fenómeno eléctrico [50][51]. Numerosos autores han utilizado métodos estadísticos para estimar el valor de la corriente de irrupción en diferentes campos de la ingeniería basados en la estadística de alto orden [52][53] en transformadores eléctricos, y en relés de sobreintensidad, que son uno de los dispositivos más importantes del sistema eléctrico de potencia porque ayudan a eliminar las corrientes anormales. Este estudio en relés introduce un nuevo principio de discriminación entre corrientes de irrupción y corrientes de cortocircuito basado en el algoritmo recursivo bayesiano. Las reglas bayesianas ayudan a combinar la información de probabilidad para encontrar la predicción más probable [54] sobre los estados de corriente. Los resultados experimentales demuestran que este método es eficaz y ayuda al relé a evitar disparos molestos de la protección contra cortocircuitos [55].

4.2 OBJETIVOS

El objetivo del primer estudio realizado sobre la disipación térmica (Artículo 1) es comparar los resultados obtenidos previamente, a diferentes temperaturas de contorno, mediante simulación térmica teórica del modelo 3D de luminarias LED de alumbrado público mediante el software de simulación ANSYS Fluent. Contrastando estos resultados con los resultados prácticos obtenidos con una cámara de imagen térmica, el estudio tratará de demostrar cómo el fenómeno de disipación térmica juega un papel fundamental en el rendimiento lumínico de la tecnología LED. El parámetro estudiado en este trabajo es la temperatura de unión (T_j), y cómo puede utilizarse para predecir las propiedades luminosas en la fase de diseño de las luminarias con el fin de aumentar su vida útil.

Se propondrá una metodología de análisis que permita calcular la disipación térmica teórica, a priori, en función del diseño, los materiales y la temperatura ambiente de

funcionamiento de las luminarias LED, para posteriormente comparar y discutir los resultados teóricos con los experimentales realizados con una cámara termográfica. La comparación de resultados entre las simulaciones y la disipación real en el laboratorio permiten analizar la temperatura de unión de los LED ya que es un parámetro que no se puede medir a través de una cámara termográfica.

Para ello, analizamos térmicamente, según el método propuesto, una luminaria LED, realizando simulaciones, a diferentes temperaturas del entorno de trabajo de trabajo [56]. Considerando que la disipación térmica es esencial para mantener las propiedades luminosas de las luminarias LED, repercutiendo directamente en la vida útil del equipo y su calidad lumínica [57], en relación directa con el impacto que estas deficiencias pueden tener sobre los ritmos circadianos de las personas expuestas a la luz artificial defectuosa [58,59].

Asimismo, la vida útil de las luminarias LED está relacionada con la calidad del equipo y la capacidad de los materiales para disipar el calor irradiado, aspecto que incide directamente en el ACV (análisis del ciclo de vida) sobre la huella de carbono [60] y los impactos ambientales de la fabricación de nuevos equipos sustitutivos [57,61]. Hoy en día, es muy importante invertir en luminarias sostenibles con una baja huella de carbono y una alta durabilidad [60].

El objetivo principal del estudio sobre la calidad de energía (Artículo 2) es establecer una metodología innovadora basada en métodos avanzados de toma de decisiones multicriterio (entropía y CRITIC) para predecir comportamientos anómalos en la corriente de irrupción (picos) en instalaciones de luminarias LED, ya que actualmente es difícil predecir el valor de la corriente de irrupción, así como su adecuada selección en la fase de diseño o antes de ser montadas en el circuito para evitar consecuencias negativas en los componentes y dimensionarlos correctamente, produciendo un ahorro de costes en la sustitución de elementos del circuito como diferenciales e interruptores.

Se propone una metodología estadística para estimar el pico de corriente de irrupción, en función de la arquitectura electrónica, de luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano. Para ello se han analizado cinco luminarias LED de diferente año de fabricación y diferentes características eléctricas y electrónicas. Estas luminarias ensayadas fueron los primeros tipos de luminarias LED que se instalaron en la ciudad de Jaén y que aún están en funcionamiento. Utilizando un analizador de redes en el laboratorio, se midió el valor del pico de corriente de arranque de cada luminaria y se guardaron los datos con el software del analizador. Posteriormente, estos datos de laboratorio se procesaron mediante los dos métodos estadísticos de toma de decisiones, expuestos anteriormente, y se compararon los resultados finales obtenidos. Esta comparación permitirá una predicción aproximada del valor de la corriente de pico antes de la instalación de las luminarias en las carreteras, lo que supondrá un ahorro económico en el cableado eléctrico y en el correcto dimensionamiento de los elementos de protección del sistema.

4.3 METODOLOGÍA

En el presente apartado de la tesis doctoral se detallarán las metodologías empleadas en los estudios experimentales que componen este trabajo con el fin de alcanzar los objetivos propuestos. Además, se expondrán detalladamente los materiales y aparatos de medida utilizados en el desarrollo de la fase experimental.

4.3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL ESTUDIO DE DISIPACIÓN TÉRMICA

La metodología aplicada en este trabajo consta de dos partes. En primer lugar, se realiza una simulación de la disipación térmica de un modelo de luminaria LED aplicada al alumbrado urbano bajo diferentes condiciones de contorno.

La luminaria modelo corresponde a una luminaria LED de alta potencia con un diseño específico para conseguir un rendimiento lumínico adecuado y una disipación térmica óptima. Se procedió a analizar los resultados y observar la disipación térmica teórica que se produce en la misma utilizando el software ANSYS Fluent [62].

Posteriormente, este trabajo se complementa con un análisis de validación de la metodología con los resultados prácticos realizados con una cámara termográfica. Se analizaron los resultados reales de la disipación térmica de la luminaria respecto a las condiciones de contorno en el laboratorio de iluminación [63], tratando de evaluar y contrastar los resultados teóricos, previstos a priori en la fase de diseño, con los resultados reales y prácticos obtenidos [64]. Se pretende justificar que un diseño adecuado y la elección de materiales son elementos clave que permiten una mejor disipación del calor en las luminarias LED, mejorando su estabilidad y su rendimiento lumínico [65].

El análisis mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) se representa en el siguiente esquema, a través de la cual obtuvimos los resultados teóricos de la disipación térmica que fueron producidos por el modelo y así poder realizar la comparación entre los datos obtenidos entre las simulaciones teóricas y los datos experimentales obtenidos con la cámara termográfica [66].

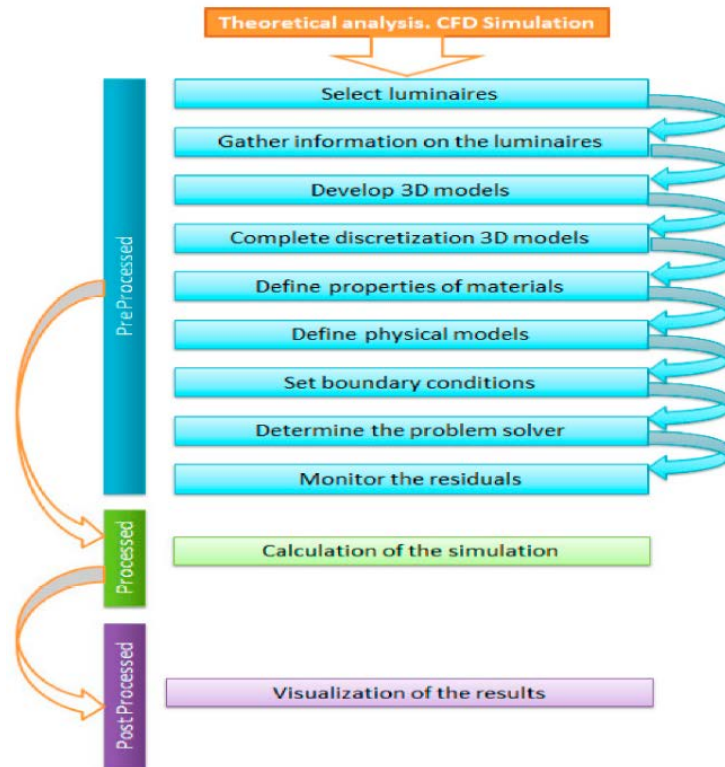


Figura 1 Diagrama de flujo para el análisis de la disipación térmica teórica. Fuente: elaboración propia

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

El análisis CFD complementa las pruebas y la experimentación reduciendo el esfuerzo total y el coste totales necesarios para la experimentación y la adquisición de datos.

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

- **Pre-procesado**
- *Seleccionar las luminarias para el estudio*

El estudio se ha realizado seleccionando una luminaria de alta potencia fabricada con un novedoso diseño, especialmente orientado a la mejora de la disipación térmica, y que se denominado Modelo.

- *Obtención de la información sobre la luminaria que se va a analizar*

El fabricante proporcionó las diferentes características y propiedades de la luminaria. El modelo consta de diferentes componentes y materiales que se adjuntan en la Tabla 1.

La potencia nominal total de la luminaria es de 204W, de los cuales 192W son para el funcionamiento de los LED y 12W para los drivers.

Los drivers están compuestos por un circuito electrónico que realiza las siguientes funciones:

- Transformar la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC), que es la que utilizan los LED para su correcto funcionamiento;
- Adaptar la tensión y la corriente de salida a las necesidades de los LED.

Componente	Subcomponente	Parte	Material	Información
Tapa	-	-	PC	Opaco
Disipador	-	-	Aluminio	Confidencial
Portaequipos	-	-	PA66 – 30FV	-
Equipamiento	-	-	PA66 – 30FV	-
Drivers	PCB driver	Microchips	Silicio	2 drivers; 6 W/driver
		Soldadura	Estaño	
		Base	Aluminio	
	Housing	-	PC	
Difusor	-	-	PC	Transparente
Chasis	-	-	PA66 – 30FV	-
PCB LED	-	-	Aluminio	-
LED	-	-	Cobre / Material Rth	96 LED; 2 W/LED

Tabla 7 Componentes, materiales y potencias. Fuente: ATP iluminación S.A

- *Elaboración del modelo 3D del equipo*

La elaboración del modelo se llevó a cabo mediante el software CATIA (Computer-Aided Three- Dimensional Interactive Application) [67], que consiste en un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistidos por ordenador.

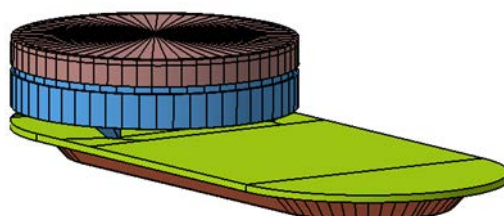


Figura 2 Modelado en 3D de la luminaria Modelo. Fuente: elaboración propia

- *Discretización del modelo 3D para el estudio*

Para ejecutar la discretización se utilizó el programa específico Altair HyperMesh. Se trata de una plataforma de software de simulación de ingeniería asistida por ordenador (CAE, Computer Aided Engineering), en la que es posible crear modelos de elementos finitos para el análisis y preparar mallas de alta calidad de forma eficiente. El método de discretización en el modelo 3D fue en volúmenes finitos [68].

Se realizó una malla bidimensional con elementos triangulares (tríadas). Controlar la malla con skew significa que el ángulo entre el vector de cada nodo al punto medio del lado opuesto y el vector entre los dos lados medios adyacentes en cada nodo del elemento es de 90 grados menos el ángulo hallado mediante skew. En este estudio, el ángulo buscado es de 60 grados, proporcionando un triángulo lo más parecido posible a un triángulo equilátero para la posterior generación de elementos 3D.

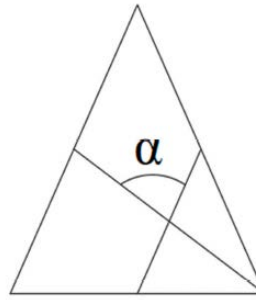


Figura 3 Definición de skew. Fuente: Guía de control del mallado HyperMesh

BEST	OK	VERY POOR

Figura 4 Control de malla. Fuente: Guía de control de malla HyperMesh.

A continuación, se representan los componentes discretizados.

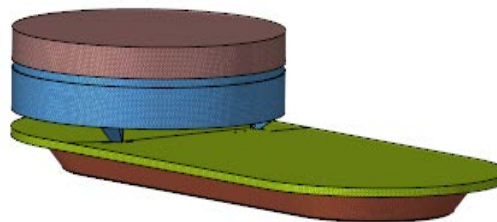


Figura 5 Modelo discretizado de luminaria. Fuente: elaboración propia a partir del software HyperMesh.

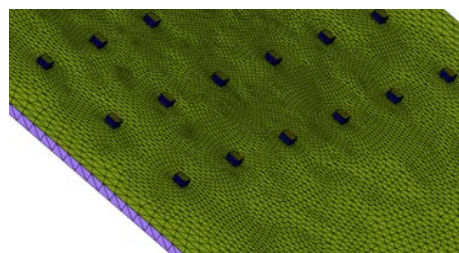


Figura 6 PCB y diodo LED discretizados. Fuente: elaboración propia a partir del software HyperMesh

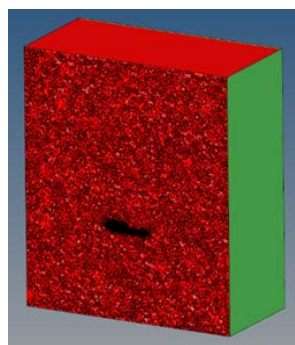


Figura 7 Sección media de los componentes y el aire generados con el Modelo tetraédrico.

La malla se generó en tríadas y un tetraedro, aunque con mallas cuadradas y hexaedros se pueden proporcionar soluciones de mayor calidad con menos celdas/nodos. Las mallas cuadradas y hexaédricas muestran una menor difusión numérica cuando la malla se alinea con el flujo, pero también se requiere un mayor esfuerzo para generar una malla cuadrada y hexaédrica.

- *Configuración de las características físicas y del solucionador*

Definición de las propiedades de los materiales

Es necesario definir las propiedades de los materiales que se van a asignar a los diferentes componentes de la luminaria para tenerlas en cuenta durante el estudio y así tener una mayor precisión en los resultados al compararlos con los datos experimentales

Material	Densidad kg/m ³	Calor específico J/kg·K	Conductividad térmica W/m·K
Aluminio	2750	961	200
Silicio	2330	700	148
Estaño	7365	228	66.6
PA66 – 30FV	1370	2290	0.29
PC	1200	1250	0.19
Cobre	8900	394	387
Material Rth	3300	780	52.91

La resistencia térmica del LED (Rth) de la luminaria Modelo es de 2,1 W / K

Tabla 8 Propiedades de los materiales del modelo. Fuente: catálogo ATP

Definición de modelos físicos

1. Ecuaciones de conservación.

El software ANSYS Fluent se basa en el método de volumen finito [69]. El dominio se discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control y las ecuaciones generales de conservación de masa, momento, energía, etc., se resuelven en este conjunto de volúmenes de control. Todas las ecuaciones se resuelven numéricamente para representar el campo de soluciones.

2. Método de volumen finito

Las ecuaciones generales de conservación de la masa, cantidad de movimiento, energía, etc. se resuelven en este conjunto de volúmenes de control. En el centroide de cada volumen de control hay un nodo donde se calcula el valor de las variables y, en los bordes, su valor puede conocerse mediante interpolación. Luego, continuamos con una aproximación de las ecuaciones de conservación para determinar un sistema de ecuaciones algebraicas y obtener su solución por métodos iterativos.

Partiendo de la ecuación general de transporte, que obedece a las ecuaciones de Navier-Stokes en la forma integral [70]

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \vec{v} \Phi \cdot \vec{n} dA = \oint_A \rho \Gamma \nabla \Phi \cdot \vec{n} dA + \int_V S_\phi dV, \quad (1)$$

Donde:

Φ = variable transportada por un medio

ρ = densidad del medio por el que se transporta Φ

V = velocidad de desplazamiento de Φ a través del medio

Γ = constante de difusión del medio

S_ϕ = término fuente / sumidero de la variable transportada

A = frontera

\vec{v} = vector velocidad de Φ a través del medio

\vec{n} = vector normal a la superficie

El primer término corresponde a la variación temporal de la variable transportada por el medio dentro de un volumen; el segundo término corresponde a 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 sólo del gradiente de dicha variable, y el último término se debe al término fuente de la variable dentro del volumen.

El término fuente, S_ϕ de la ecuación (1), contiene los términos de radiación calculados mediante el modelo de ordenadas discretas (DO). El modelo DO transforma la ecuación de transporte radiactivo 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 el mismo que el utilizado para las ecuaciones de flujo y energía, y se representa en la ecuación (2) [70]:

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

Donde:

\vec{r} = vector de posición

\vec{s} = vector dirección

\vec{s}' = dirección del vector disipación

s = longitud del trayecto

a = coeficiente de absorción

n = índice de refracción

σ_s = coeficiente de dispersión

σ = Constante de Stefan - Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$)

I = Intensidad de radiación

T = temperatura local en Kelvin

Φ = función de fase

Ω' = ángulo sólido

Para volúmenes finitos y volúmenes subfronterizos que corresponden a la frontera del volumen, se obtiene [38]:

$$V_{\text{cell}} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \Phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi \nabla \Phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi + V_{\text{cell}} \quad (3)$$

Donde:

N_{faces} = number of faces of volume

f = fluid

Las ecuaciones diferenciales se discretizan en un sistema de ecuaciones algebraicas que se resuelven numéricamente para obtener un campo de soluciones.

Aplicación de las condiciones límite

Las condiciones de contorno se determinaron para estudiar el comportamiento de la luminaria en determinados casos. Las condiciones de contorno se determinaron en el aire, que se encuentra rodeando a la luminaria. Se ha intentado simular varias temperaturas ambientales ser simuladas [56], tales como, 40°C, 20°C y 10°C, con una velocidad inicial ascendente de 0,02 m/s.

3. Determinación del solucionador de problemas.

ANSYS Fluent le permite elegir uno de los dos métodos numéricos:

- Solución basada en la presión
- Solución basada en la densidad

En ambos métodos, el campo de velocidad se obtiene a partir de las ecuaciones de momento. En el método basado en la densidad, se utiliza la ecuación de continuidad para obtener el campo de densidad, mientras que el campo de presión se determina a partir de la ecuación de estado.

Por otro lado, en el enfoque basado en la presión, el campo de presión se extrae mediante una ecuación de presión o de corrección de la presión que se obtiene manipulando las ecuaciones de continuidad y de momento.

En nuestro caso, utilizamos el método basado en la presión, que utiliza un algoritmo que pertenece a una clase general de métodos, denominada método de proyección. a una clase general de métodos, denominada método de proyección.

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

- *Algoritmo segregado basado en la presión:* Las ecuaciones de gobierno individuales para las variables de solución (por ejemplo, u, v, w, p, T, k, etc.) se resuelven una tras otra. La convergencia de la solución es relativamente lenta, ya que las ecuaciones se resuelven de forma desacoplada.

- *Algoritmo acoplado basado en la presión:* 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. Dado que las ecuaciones de momento y continuidad se resuelven de forma fuertemente acoplada, la tasa de convergencia de la solución mejora significativamente en comparación con el algoritmo segregado. La convergencia con este algoritmo mejora con respecto al algoritmo segregado, lo que se tiene en cuenta para elegir este método.

4. Monitorización de residuales

En un análisis CFD, el residuo mide el desequilibrio local de una variable almacenada en cada volumen de control. Para CFD, los niveles residuales de 10^{-4} se consideran

ligeramente convergentes, los niveles de 10^{-5} se consideran convergentes y los niveles de 10^{-6} se consideran muy convergentes.

- **Procesado**

Las definiciones residuales que son útiles para una clase de problemas a veces son engañosas para otras clases de problemas. Por lo tanto, es una buena idea juzgar la convergencia no sólo examinando los niveles residuales, sino también controlando las cantidades integradas relevantes, como la transferencia de calor o el coeficiente de arrastre.

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

- **Post-procesado**

Los resultados se examinaron para revisar la solución y extraer los datos. La herramienta utilizada es Altair HyperView, un completo entorno de post-procesamiento y visualización para CFD. Éste permite visualizar los datos de forma interactiva.

4.3.2 METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE DE IRRUPCIÓN O ARRANQUE

- **Instrumentación**

Los instrumentos de medida empleados en el presente estudio de la corriente de irrupción son los siguientes:

- *Analizador de redes*

Un analizador de redes es un dispositivo para medir las propiedades de las redes eléctricas, especialmente relacionadas con la calidad eléctrica (tensión, corriente, frecuencia) y la calidad de potencia (consumo, armónicos de tensión, armónicos de corriente). El modelo utilizado en esta investigación es el Fluke 437-Series II.

Característica	Valor
Máxima tensión de entrada	1000 Vrms
Pico máximo de tensión de medida	6kV
Impedancia de entrada	1MΩ
Rango de medida de corriente	0,5-200A
Corriente de arranque máxima	5500 A peak
Factor de pico de amperios	1-10
Frecuencia	42,5-69 Hz
Factor de potencia	0-1

Tabla 9 Tabla de especificaciones del analizador de red. Fuente: Manual Fluke

- *Sonda de corriente*

La sonda de corriente utilizada, junto con el analizador de red es la sonda Flexi-TF Fluke i430.

Característica	Valor
Rango de corriente	6000A AC RMS
Tensión de salida (1000ARMS, 50Hz)	86,6mV
Precisión	±1%
Impedancia de salida	82Ω
Impedancia de carga	50MΩ
Resistencia interna	10,5Ω
Ancho de banda	10Hz-7kHz
Tensión de funcionamiento	1000V AC RMS

Tabla 10 Especificaciones de la sonda de corriente. Fuente: Manual Fluke

- **Dispositivos sometidos a ensayo**

Se ensayaron cinco luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano, de diferentes años de producción y, por tanto, diferentes tecnologías y componentes electrónicos.

- *Luminaria LED modular GL1A*

Se trata de una luminaria LEDUS LED, fabricada en 2014, con una potencia nominal de 60W y un factor de potencia de 0,95. La fuente LED de esta luminaria es Philips-Lumileds REBEL ES. Esta luminaria dispone de un driver LED INVENTRONICS modelo EUC-060S105SV-HP04 de 60W que funciona a 90-305 V y cuyas características se presentan en la siguiente tabla:

Característica	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	90V	305V
Frecuencia	47Hz	63Hz
Corriente de entrada AC	0,36A	0,8A
Corriente de pico máxima	-	60A
Factor de potencia	0,95	-

Tabla 11 Tabla de especificaciones del driver LED Inventronics de 60 W. Fuente: Inventronics

- *Luminaria LED modular T1A*

Se trata de una luminaria LEDUS LED, fabricada en 2014, de 80W de potencia nominal, con un factor de potencia de 0,95. Al igual que en el modelo anterior, la fuente LED es Philips-Lumileds REBEL ES. Esta luminaria también cuenta con un driver LED de la marca INVENTRONICS, modelo EUC-085S070SV-HP04 de 85W operando a 90-305V, cuyas características principales son las siguientes:

Característica	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	90V	305V
Frecuencia	47Hz	63Hz
Corriente de entrada AC	0,5A	1,1A
Corriente de pico máxima	-	60A
Factor de potencia	0,95	-

Tabla 12 Tabla de especificaciones del driver LED Inventronics 85W. Fuente: Inventronics

- *Luminaria LED Philips Mini Iridium*

Se trata de una luminaria Philips LED de 20W de potencia nominal, fabricada en 2014, de la familia de productos Iridium, con un factor de potencia de 0,95. Esta luminaria dispone de un driver PHILIPS LEDSTREET'4 441137071190, de 40W de potencia nominal, que funciona entre 220V y 240V. Las características del driver se resumen en la siguiente tabla:

Característica	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	220V	240V
Frecuencia	45Hz	50Hz
Corriente de entrada AC	-	0,19A
Corriente de pico máxima	-	20A
Factor de potencia	0,95	-

Tabla 13 Tabla de especificaciones del driver LEDSTREET4. Fuente: Philips

- *Luminaria LED NaviaP*

Se trata de una luminaria LED Solydi de 50W de potencia nominal, fabricada en 2018, de la familia de productos Serie Navia, con un factor de potencia de 0,95. La fuente LED de esta luminaria es CREE Xlamp XT-E. Este equipo está equipado con un driver LED MEANWELL, modelo LPFH-60D-24. Las características del driver son las siguientes:

Característica	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	200V	400V
Frecuencia	47Hz	63Hz
Corriente de entrada AC	0,32A	0,4A
Corriente de pico máxima	-	40A
Factor de potencia	0,95	-

Tabla 14 Tabla de especificaciones del controlador LED LPFH-60D-24. Fuente: Meanwell

- *Luminaria LED ATP Aire 7*

Se trata de una luminaria ATP LED con una potencia nominal de 200W, fabricada en 2018, de la familia de productos Air Series, con un factor de potencia de 0,97. La fuente LED utilizada en esta luminaria es Osram LUW CQAR (streetwhite). La luminaria está equipada con un driver de la marca TRIDONIC, modelo LCO 200/1400 mA fixC L SNC2, cuyas características principales se muestran en la siguiente tabla:

Característica	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	100V	240V
Frecuencia	50Hz	60Hz
Corriente de entrada AC	-	0,97A
Corriente de pico máxima	-	40A
Factor de potencia	0,97	-

Tabla 15 Tabla de especificaciones del driver LED LCO SNC2. Fuente: TRIDONIC

- **Montaje en laboratorio**

Para la adquisición de los datos de corriente de entrada de las luminarias analizadas, se utilizó un analizador de redes Fluke 437 Serie II. El esquema de conexión de las luminarias y el analizador en el laboratorio se muestra en la siguiente figura:

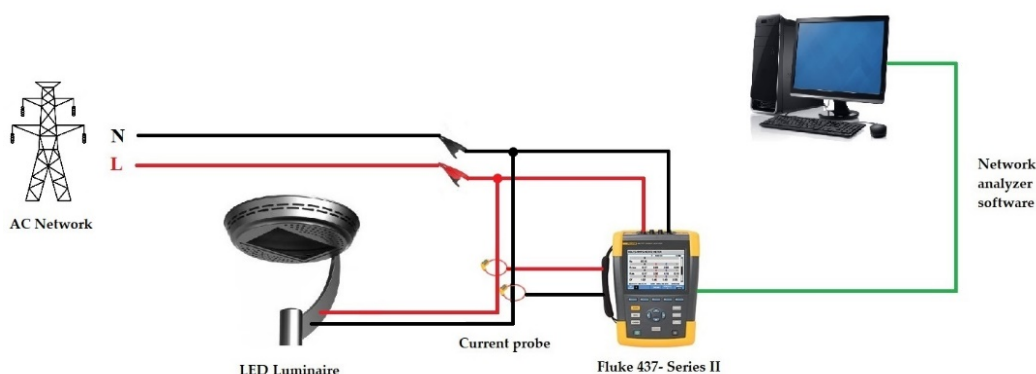


Figura 8 Esquema de montaje en laboratorio para las mediciones. Fuente: elaboración propia

- **Metodología**
- *Flujograma*

La estructura metodológica de este estudio se describe en esta sección. Se divide principalmente en dos bloques: Proceso de medición y aplicación de métodos de toma de decisiones multicriterio para la evaluación de la corriente de irrupción.

Proceso de medición: El proceso de medida se realizó en el laboratorio de iluminación y domótica de la Universidad de Jaén. Se ensayaron 12 procesos de arranque de cada una de las luminarias y se tomaron los datos con el analizador de redes.

Los procesos de arranque se realizaron de forma independiente y en diferentes días de análisis de las luminarias en el laboratorio. Se produjo un proceso de arranque en frío, que se define como el tipo de arranque que se produce en las luminarias tras un largo periodo de inactividad, normalmente de varias horas.

Las luminarias se conectaron a una red monofásica de pared (220V, 50Hz) y dentro de un laboratorio con equipos informáticos, que es el caso de ensayo más severo, ya que estos equipos informáticos, debido al elevado número de componentes

electrónicos, hacen que la calidad de la energía de la red sea más desfavorable debido al alto contenido armónico que producen y por tanto las medidas de corriente de irrupción que se toman son más severas, ya que es el caso más desfavorable.

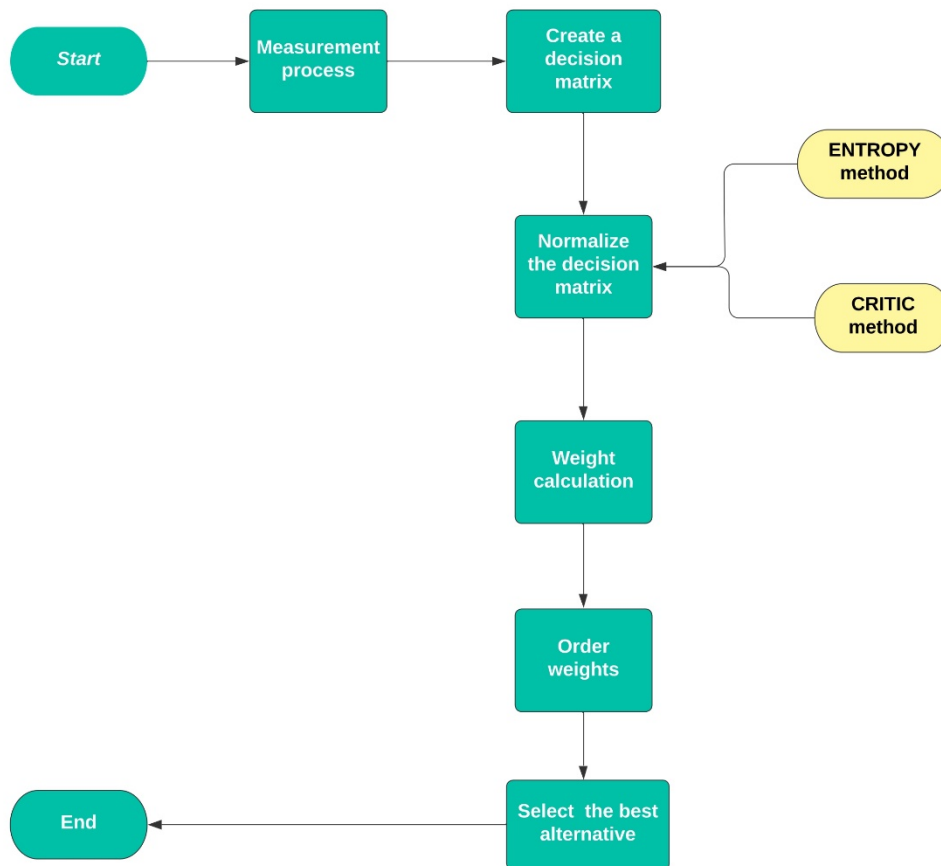


Figura 9 Diagrama de flujo para el análisis de la corriente de irrupción. Fuente: elaboración propia

- *Métodos de toma de decisiones multicriterio*

Los métodos de decisión multicriterio implican la selección entre un conjunto de alternativas viables, basándose en un conjunto de criterios cualitativos y/o cuantitativos, que pueden estar en conflicto. Estos métodos se dividen básicamente en tres tipos: subjetivos, objetivos e integrados.

1. Los métodos subjetivos presentan las siguientes características: El papel de asignar la importancia a los criterios recae en el responsable de la toma de decisiones, que debe basarse en su experiencia previa, en las limitaciones del diseño o en las preferencias del diseñador. Algunos ejemplos son los métodos AHP, SMART y SWARA.

2. En los métodos objetivos, el responsable de la toma de decisiones no interviene en la determinación de la importancia de los criterios. Es útil cuando el responsable de la toma de decisiones no existe. Ejemplos son los métodos ENTROPÍA y CRITIC.

3. Los métodos integrados combinan las ponderaciones subjetiva y objetiva en un único componente.

Los dos métodos utilizados en este trabajo son métodos objetivos porque no hay ningún experto que asigne importancia a un determinado criterio y porque las medidas de corriente de irrupción tomadas en el laboratorio son objetivas, ya que se han medido con un dispositivo de precisión como un analizador de redes.

Por un lado, el método CRITIC se ha utilizado en el campo de la economía para la selección de fabricantes por contrato [71] o en otros campos de la ingeniería como las energías renovables para la selección de un sistema híbrido de generación de energía en una vivienda [72]. Por otro lado, el método de entropía se ha empleado en el campo de la ingeniería asistida por ordenador (CAE) [73] o en el campo de la fabricación para la selección de un material óptimo [74]

a) Método de entropía

El método de la entropía (EM) es un método de ponderación muy utilizado que mide la dispersión de valores en la toma de decisiones [75]. El concepto de entropía fue introducido por el matemático estadounidense Claude Shannon en 1948 [76] y significa hasta qué punto un suceso puede ser estocástico. Este método informa de la aleatoriedad de un suceso de forma matemática [77]

El procedimiento para la aplicación de este método es el siguiente [78]:

Paso 1: Construcción de la matriz de decisión

Los valores de la corriente de irrupción para cada una de las luminarias analizadas se expresan en una matriz de decisión de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Donde las filas de la matriz simbolizan los tipos de luminarias urbanas analizadas y las columnas simbolizan cada uno de los procesos de arranque en los que se midió la corriente de irrupción.

Paso 2: Normalización de la matriz de decisión (índices de rendimiento) para obtener los resultados del proyecto p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (5)$$

Paso 3: Cálculo de la medida de entropía de los resultados del proyecto mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\ln m}, \quad (7)$$

Paso 4: Definir el peso objetivo basado en el concepto de entropía

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)}, \quad (8)$$

b) Método CRITIC

El método CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) es uno de los métodos que determina las ponderaciones objetivas de los criterios [71] y fue desarrollado por Diakoulaki en 1995 [79]. Este método utiliza el análisis de correlación para encontrar los contrastes entre criterios [80]. En este método se evalúa la matriz de decisión y se utiliza la desviación típica de los valores normalizados de los criterios por columnas y los coeficientes de correlación de todos los pares de columnas para determinar el contraste de criterios [81]

El procedimiento de aplicación de este método es el siguiente [79]:

Paso 1: Construcción de la matriz de decisión

La matriz de decisión se construye del mismo modo que en el método de la entropía.

$$M = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Paso 2: Normalizar la matriz de decisión

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\text{worst}}}{x_j^{\text{best}} - x_j^{\text{worst}}}, \quad (10)$$

Paso 3: Calcular la desviación típica σ_j para cada criterio j .

Paso 4: Determinar la matriz simétrica de $n \times n$ con el elemento r_{jk} , que es el coeficiente de correlación lineal entre los vectores \mathbf{x}_j y \mathbf{x}_k .

Paso 5: Calcular la medida del conflicto creado por el criterio j con respecto a la situación de decisión definida por el resto de criterios.

$$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}), \quad (11)$$

Paso 6: Determinación de la cantidad de información en relación con cada criterio.

$$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}), \quad (12)$$

Paso 7: Determinación de los pesos objetivos

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^m c_j}, \quad (13)$$

4.4 RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo en el marco de la presente Tesis Doctoral.

4.4.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA EN LA CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA ÚTIL DE LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO

La sección de resultados de este estudio se divide en dos partes. Por un lado, los resultados teóricos, donde se muestran los datos obtenidos con el software de simulación a las tres temperaturas límite, así como la validación de los materiales de las luminarias comparando las temperaturas límite de cada uno de los materiales que componen las luminarias con las temperaturas de funcionamiento obtenidas en la simulación para cada uno de ellos.

Por último, los resultados prácticos, donde se comprueba la disipación térmica de la luminaria LED a una temperatura ambiente de 20 C con el fin de validar lo resultados teóricos obtenidos previamente.

- **Resultados teóricos**
- *Visualización de la temperatura y la velocidad del aire en la luminaria Modelo a 20°C*

Se representará gráficamente en color la temperatura de diferentes partes del modelo a 20°C

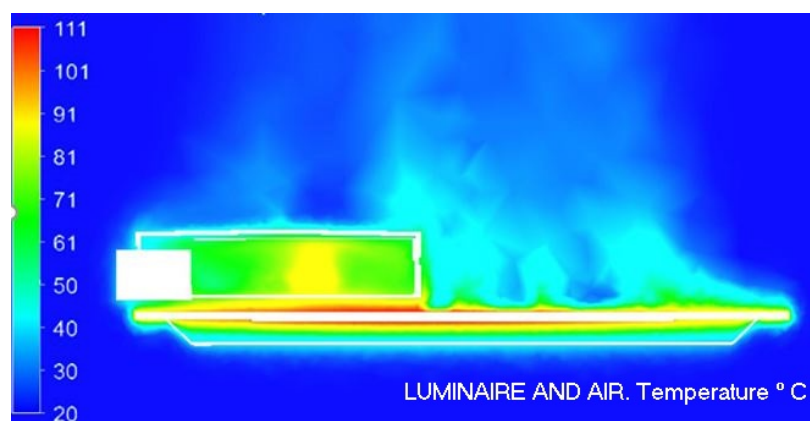


Figura 10 Temperatura Luminaria a 20°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

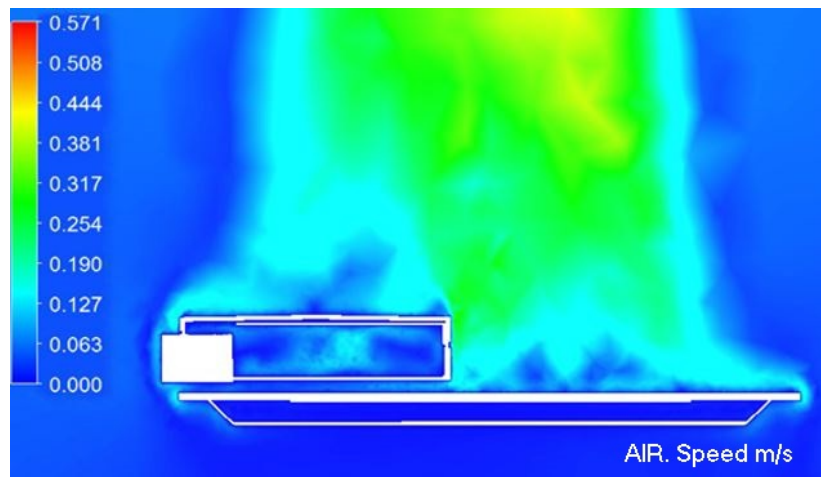


Figura 11 Velocidad del aire a 20°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

- Visualización de la temperatura y la velocidad del aire en la luminaria Modelo a 40°C

Se representará gráficamente en color la temperatura de diferentes partes del modelo a 40°C

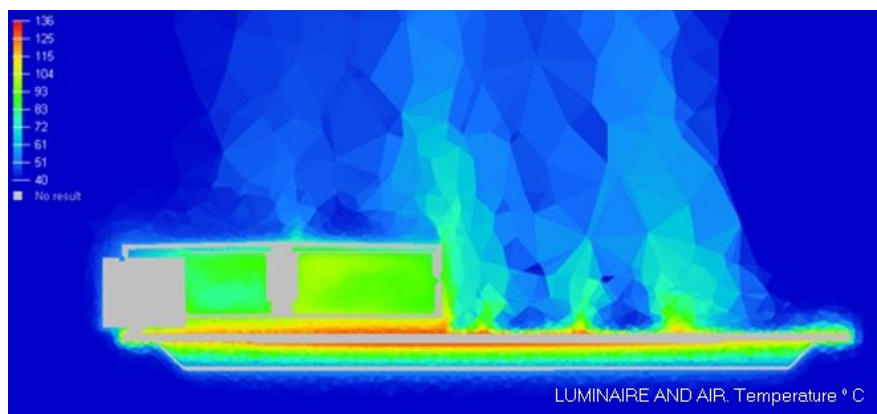


Figura 12 Temperatura Luminaria a 40°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

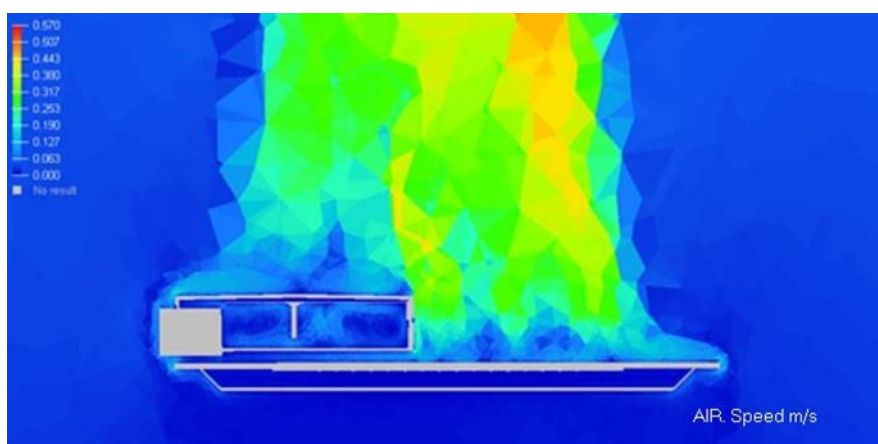


Figura 13 Velocidad del aire a 40°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

- *Visualización de la temperatura y la velocidad del aire en la luminaria Modelo a -10°C*

Se representará gráficamente en color la temperatura de diferentes partes del modelo a -10°C

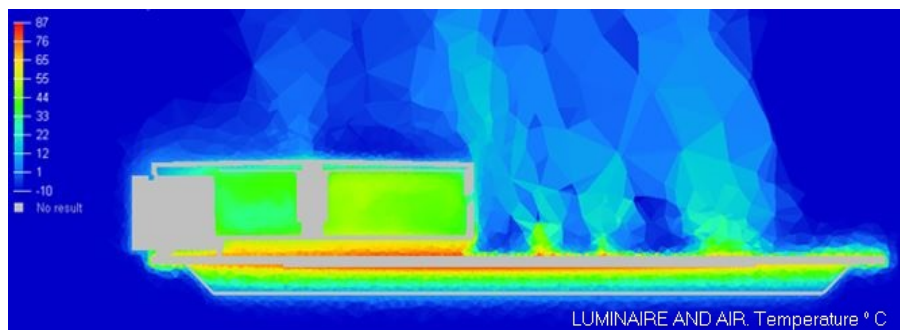


Figura 14 Temperatura Luminaria a -10°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

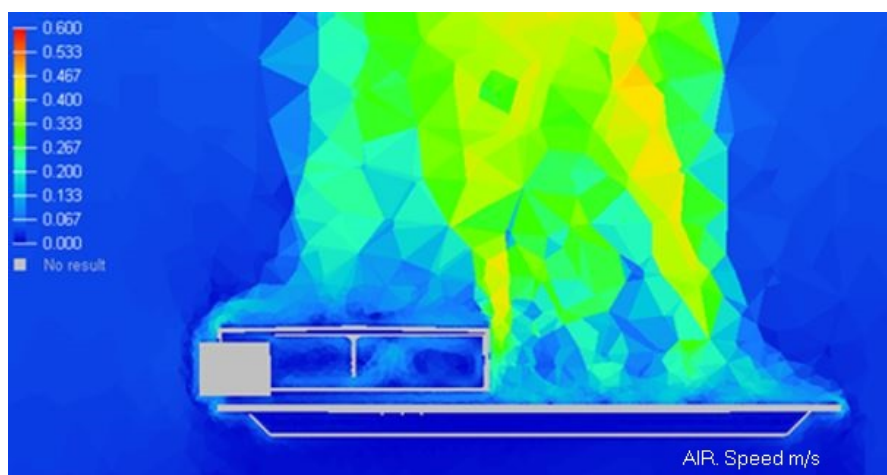


Figura 15 Velocidad del aire a -10°C ambiente. Fuente: Software HYPERVIEW

A partir de los datos teóricos obtenidos de las simulaciones, se realizará una validación de los materiales y posteriormente un análisis de los LED. La validación de los materiales consiste en la comparación de la temperatura límite que puede alcanzar el material utilizado para su funcionamiento sin tener problemas de deterioro con la temperatura máxima alcanzada en cada componente de la luminaria para observar si se supera la temperatura límite del material.

En cuanto a los drivers, no están compuestos de un solo material, ya que es una combinación de varios subcomponentes. Los componentes más débiles a la temperatura son los microchips que se montan en la PCB del driver, luego en la comparación se ha dividido la información del driver en dos filas (bases y componentes electrónicos) y para la electrónica seleccionaremos el límite de temperatura de los microchips para la evaluación del driver.

Componente	Material	Límite temperature máximo (°C)	Temperatura medida (°C)
Tapa	PC	145	70
Disipador	Aluminio	460	112
Portaequipos	PA66 – 30FV	150	77
Equipamiento	PA66 – 30FV	150	112
Bases drivers	Aluminio	460	112
Driver (Electrónica)	Silicio (Débil)	150	105
Difusor	PC	145	100
Chasis	PA66 – 30FV	150	107
PCB	Aluminio	460	117

Tabla 16 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a 20°C. Fuente: Elaboración propia

Componente	Material	Límite temperature máximo (°C)	Temperatura medida (°C)
Tapa	PC	145	90
Disipador	Aluminio	460	131
Portaequipos	PA66 – 30FV	150	97
Equipamiento	PA66 – 30FV	150	129
Bases drivers	Aluminio	460	130
Driver (Electrónica)	Silicio (Débil)	150	130
Difusor	PC	145	118
Chasis	PA66 – 30FV	150	123
PCB	Aluminio	460	137

Tabla 17 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a 40°C. Fuente: Elaboración propia

Componente	Material	Límite temperature máximo (°C)	Temperatura medida (°C)
Tapa	PC	145	42
Disipador	Aluminio	460	82
Portaequipos	PA66 – 30FV	150	47
Equipamiento	PA66 – 30FV	150	83
Bases drivers	Aluminio	460	84
Driver (Electrónica)	Silicio (Débil)	150	90
Difusor	PC	145	69
Chasis	PA66 – 30FV	150	74
PCB	Aluminio	460	88

Tabla 18 Límite máximo de temperatura del material frente a la temperatura medida en las distintas partes del Modelo a -10°C. Fuente: Elaboración propia

En las siguientes figuras, se muestra una comparación de algunos de los diferentes componentes de la luminaria y para las diferentes temperaturas ambiente de las simulaciones, dando el rango de temperaturas a las que los componentes se encuentran.

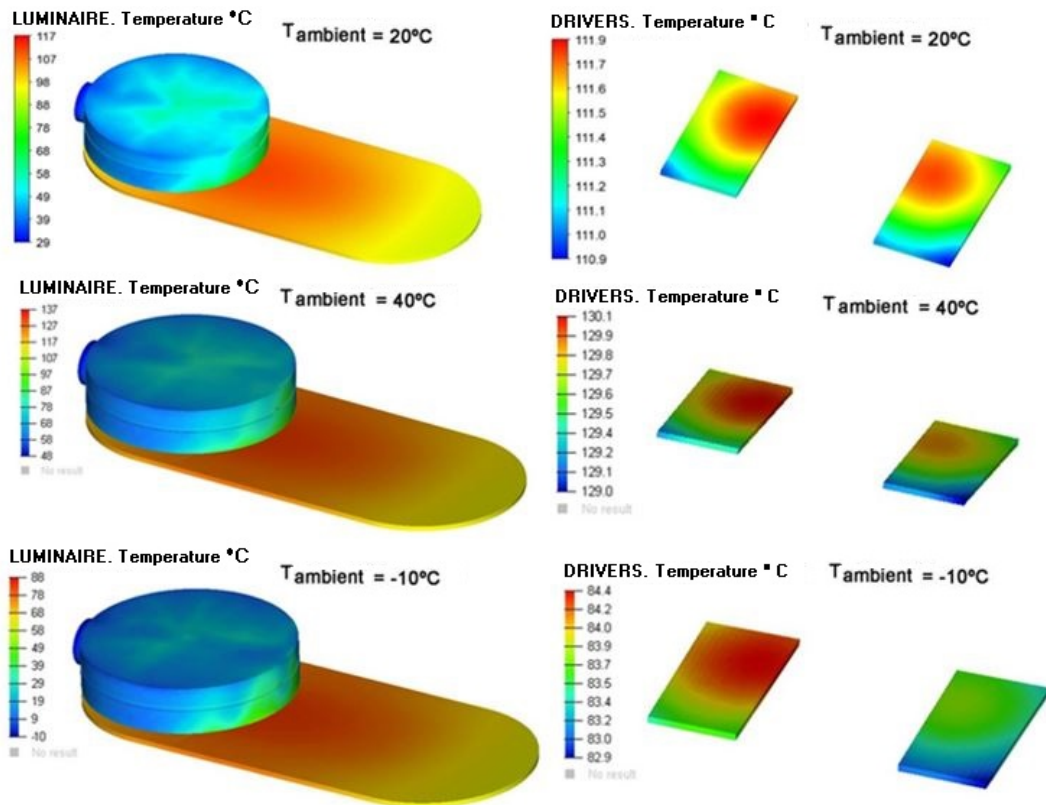


Figura 16 Rango de temperaturas de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia

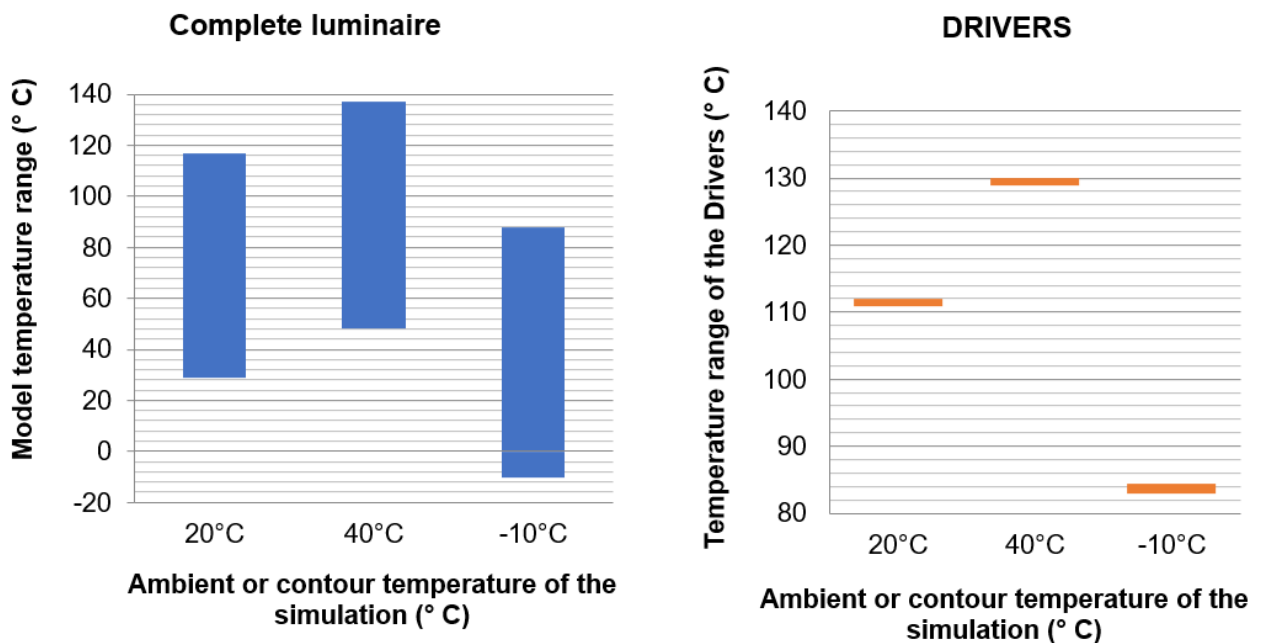


Figura 17 Rango de temperaturas de la luminaria completa y de los drivers respecto a la temperatura ambiente en cada simulación. Fuente: elaboración propia

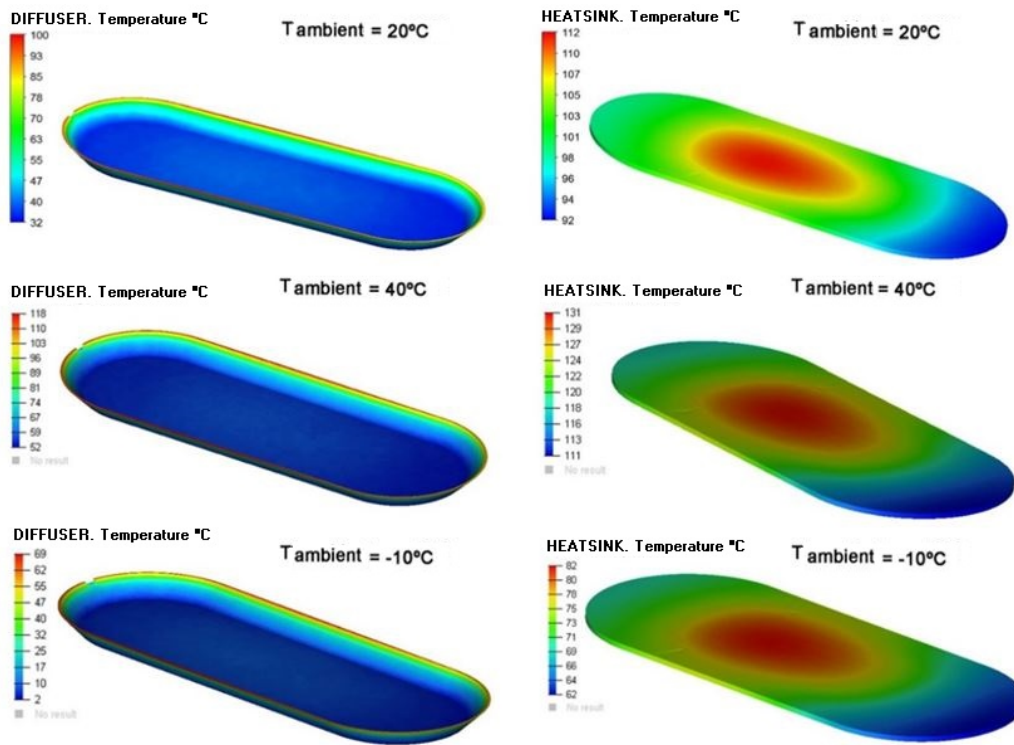


Figura 18 Comparación de la disipación del difusor (izquierda) y del dissipador (derecha) para distintas temperaturas de simulación. Fuente: elaboración propia a partir del software HYPERVIEW

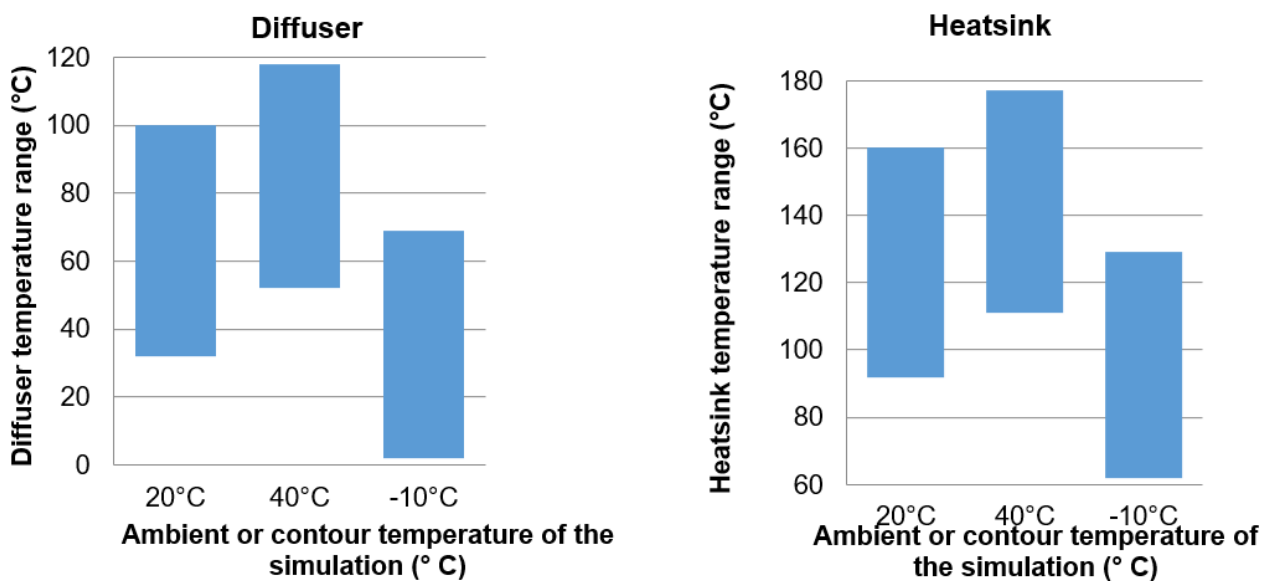


Figura 19 Rango de temperaturas del difusor y del dissipador respecto a la temperatura ambiente en cada simulación del Modelo. Fuente: cálculos propios

El dissipador térmico es de aluminio y tiene una temperatura límite de 460°C. La temperatura máxima alcanzada por el dissipador térmico en las simulaciones es muy inferior a la temperatura límite, como se muestra en la figura 17. El difusor está compuesto de PC (Policarbonato), este material tiene una temperatura límite de funcionamiento de 145°C. Los resultados de las simulaciones muestran que las

temperaturas máximas de estos componentes están dentro del rango de temperaturas de funcionamiento, como se muestra en la figura 18.

- **Resultados experimentales**

Para validar la simulación, se ensayó un prototipo de luminaria LED de alta potencia con la misma geometría y dimensiones que el modelo. Esta luminaria corresponde a la serie Aire 7 de ATP Lighting.



Figura 20 Modelo de luminaria LED Aire Serie 7 de ATP Lighting. Fuente: Catálogo de iluminación LED de ATP

En la tabla siguiente se recogen las principales características de potencia del LED y del driver.

Modelo	Potencia nominal (W)	Número de LED	Potencia por (W/LED)	Potencia DRIVER (W)
ATP Aire Serie 7	204	96	2	12 (6W/driver)

Tabla 19 Tabla de potencia de la luminaria. Fuente: Datos del fabricante

Modelo	Eficiencia (%)	Potencia nominal (W)	Rango de entrada (V)	Temperatura de almacenamiento (°C)	Salida de corriente (A)
MP4688	95	2-2.5	4.5-80	-65 to 150	Up to 1A

Tabla 20 Características del driver LED. Fuente: Datos del fabricante

Los drivers utilizados para el control de los LED es el chip MP4688 de control de alta potencia. La luminaria tiene dos PCB driver, y cada PCB driver tiene tres MP4688. Cada MP4688 integrado controla 16 LED (96 LED en la luminaria).

Cada MP4688 tiene una potencia nominal de 2W. Como tenemos una potencia nominal de 2 W, 2 PCB drivers, y 3 chips en cada PCB, tenemos un valor total de 12 W (potencia total drivers).

Para la adquisición de los datos reales de disipación térmica de la luminaria analizada, se ha utilizado una cámara termográfica a una temperatura estabilizada de 20°C y en un ambiente climatizado con una humedad relativa del 70% y una velocidad del aire de 0m/s.

La cámara termográfica utilizada es el modelo FLUKE Ti 25. Capta una imagen digital con infrarrojos y la fusiona. El rango de temperatura es de -20°C a 350°C con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. La sensibilidad térmica es de $0,1^{\circ}\text{C}$ a una temperatura ambiente de 20°C , lo que describe la diferencia más pequeña entre dos píxeles de temperatura que puede medir la cámara.

Característica	Valor
Sensibilidad térmica	$\leq 90\text{mK}$
Rango de medición de temperatura	$-20 \rightarrow +350^{\circ}\text{C}$
Precisión máxima de temperatura	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
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 x 120píxel
Tamaño de pantalla	3.7plg
Resolución de pantalla	640 x 480píxel
Número de modelo	Ti25

Tabla 21 Tabla de especificaciones de la cámara termográfica. Fuente: Manual FLUKE

Un parámetro fundamental a la hora de adquirir imágenes con la cámara termográfica es la emisividad. Todos los objetos irradian energía infrarroja. La cantidad de energía radiada depende de dos factores principales: la temperatura de la superficie del objeto y la emisividad de dicha superficie. La emisividad es una cuestión muy importante para medir la temperatura de la superficie sin estar en contacto [82]. Dependiendo del material a medir, la emisividad variará [83]. La emisividad determinada para obtener las temperaturas de los materiales se ha obtenido a partir de una tabla de emisividades.

Se ha realizado una toma de datos progresiva desde el encendido hasta la estabilización térmica del equipo, tomando datos periódicamente hasta que la temperatura se ha mantenido estable.

Para realizar las mediciones, se ha utilizado el disipador y difusor con la cámara termográfica y al tratarse de un material específico con una aleación o formulación específica en el compuesto de materiales, se han utilizado varios tipos de emisividades para obtener la temperatura exacta.

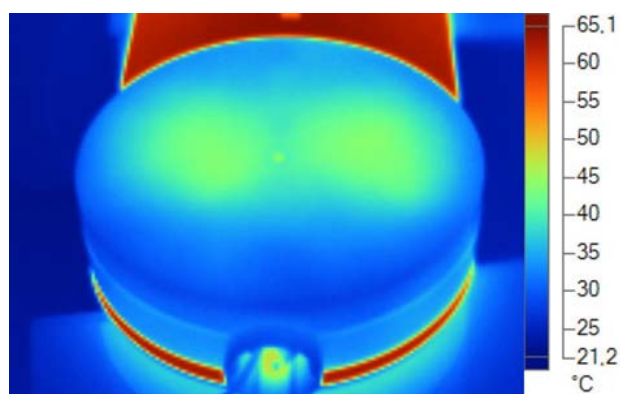


Figura 21 Datos térmicos de la cubierta. Zona azul y verde. Emisividad del plástico 0,92. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke.

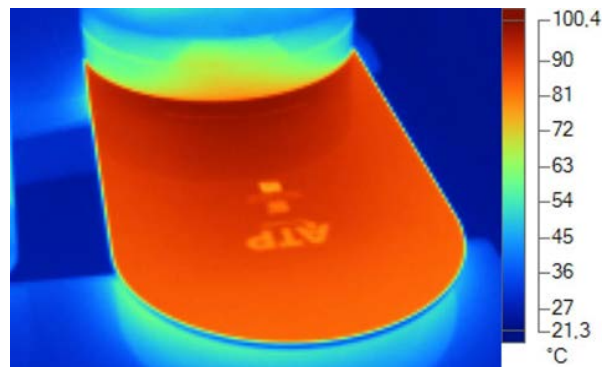


Figura 22 Datos térmicos del disipador. Zona roja. Emisividad Aleación de aluminio 0,5. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke

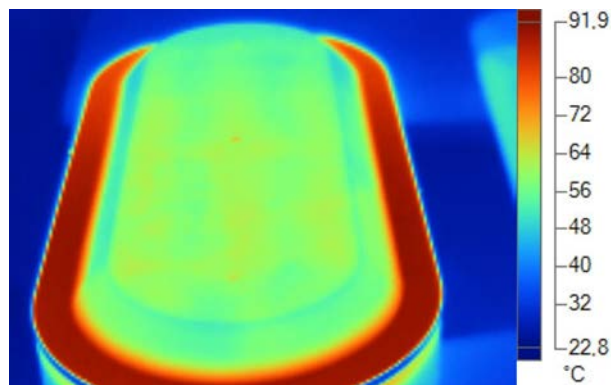


Figura 23 Datos térmicos del disipador. Zona roja. Emisividad Aleación de aluminio 0,5. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke

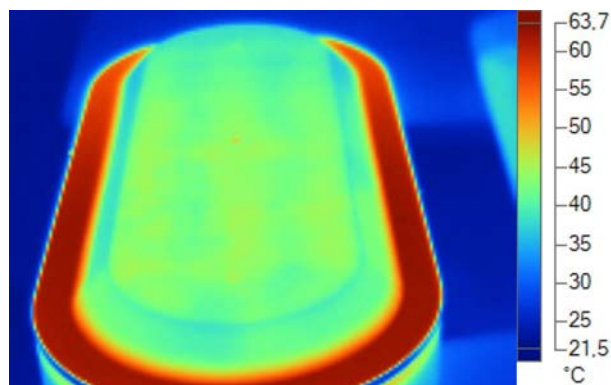


Figura 24 Datos térmicos del difusor. Zona verde. Emisividad del plástico 0,92. Fuente: Software SmartView 4.1 Fluke

4.4.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE EN LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO MEDIANTE MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Los resultados de la aplicación de técnicas de decisiones multicriterio para la evaluación de la corriente de irrupción en luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano comienza definiendo la matriz de corrientes de arranque en amperios, medida en el laboratorio para cada una de las luminarias y que denominaremos matriz de decisión, y es la siguiente:

Luminaria	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
GL1A	3,7	2	3,4	2,1	3,9	4	2,1	2,1	3,7	2,1	3,9	2,6
T1A	4,2	2,2	2,2	2,5	3,5	3,8	2,2	3,1	2,2	2,3	4,2	2,9
Min.Irid	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
NaviaP	2,4	2,8	4,3	3,6	1,9	2,8	2,3	4,6	3,1	2,5	4,5	4,6
Air 7	5,9	4,6	6,5	6,1	6,4	8	7,7	5,2	7,8	8	7	5,7

Tabla 22 Matriz de decisión

- **Método de entropía**

Al aplicar el método de entropía, el primer paso consiste en normalizar la matriz de decisión mediante la ecuación (5). Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Luminaria	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
GL1A	0,22	0,17	0,20	0,14	0,24	0,21	0,14	0,14	0,22	0,14	0,20	0,16
T1A	0,25	0,19	0,13	0,17	0,22	0,20	0,15	0,20	0,13	0,15	0,21	0,18
Min.Irid	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
NaviaP	0,15	0,24	0,26	0,25	0,12	0,15	0,16	0,30	0,18	0,16	0,23	0,29
Air 7	0,36	0,39	0,39	0,42	0,40	0,42	0,53	0,34	0,46	0,53	0,35	0,35

Tabla 23 Matriz de decisión normalizada

Una vez normalizada la matriz de decisión, el valor de entropía E_j viene dado por las ecuaciones (6) y (7), donde m representa en este caso el número de luminarias ensayadas. La siguiente tabla muestra el valor de entropía:

$p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$												
Lum	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
GL1A	-0,34	-0,30	-0,32	-0,28	-0,34	-0,33	-0,28	-0,27	-0,33	-0,27	-0,32	-0,29
T1A	-0,35	-0,31	-0,27	-0,30	-0,33	-0,32	-0,29	-0,32	-0,26	-0,29	-0,33	-0,31
M.I	-0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07	-0,08	-0,08	-0,07	-0,08	-0,06	-0,07
Nav	-0,28	-0,34	-0,35	-0,35	-0,25	-0,28	-0,29	-0,36	-0,31	-0,30	-0,34	-0,36
Air 7	-0,37	-0,37	-0,37	-0,36	-0,37	-0,36	-0,34	-0,37	-0,36	-0,34	-0,37	-0,37
$\sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$												
	-1,40	-1,39	-1,38	-1,37	-1,37	-1,36	-1,27	-1,40	-1,33	-1,27	-1,41	-1,40
E_j												
	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,79	0,87	0,83	0,79	0,88	0,87

Tabla 24 Valor de entropía

Por último, se calcula el peso objetivo basándose en el concepto de entropía mediante la ecuación (8). La siguiente tabla, muestra los resultados:

$w_j(\%)$												
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	
6,98	7,42	7,82	8,13	8,13	8,37	11,48	7,09	9,40	11,52	6,64	7,03	

Tabla 25 Concepto de entropía basado en el peso objetivo

La evolución de los pesos para cada uno de los procesos de arranque de las luminarias puede verse en la siguiente figura.

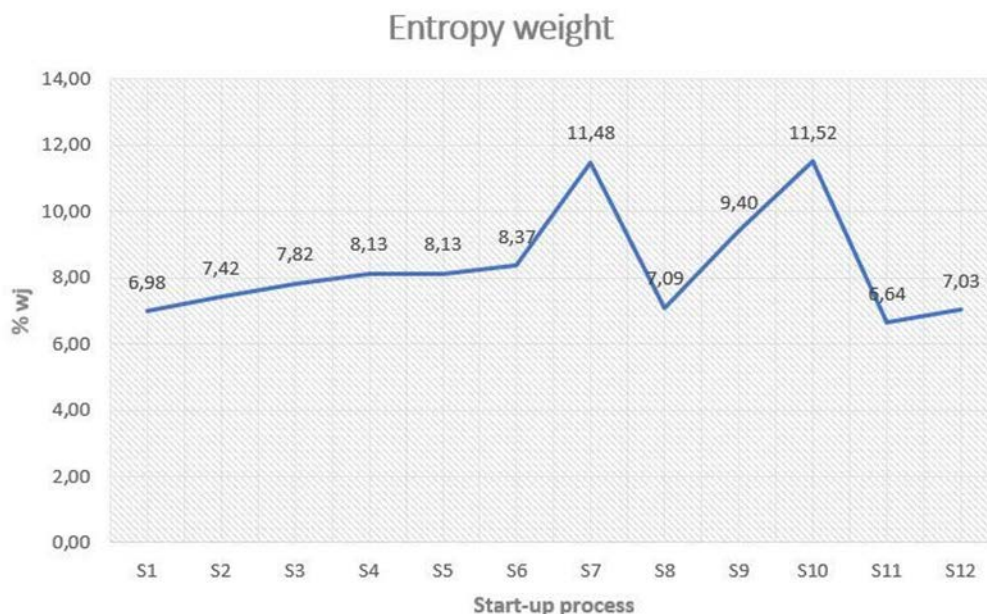


Figura 25 Peso de la entropía en los procesos de arranque

Como puede verse en el gráfico anterior, el valor de peso más alto es 11,52, que corresponde al proceso de encendido número 10. Por lo tanto, las corrientes asignadas a este peso y a este proceso de encendido son las siguientes:

Corriente arranque Entropía (A)	
Luminaria	S10
GL1A	2,1
T1A	2,3
Mini-Iridium	0,3
NaviaP	2,5
Air 7	8

Tabla 26 Corriente de irrupción mediante método de entropía

- **Método CRITIC**

Al igual que el método de la entropía, cuando se aplica el método CRITIC, el primer paso consiste en normalizar la matriz de decisión mediante la ecuación (10). Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Luminaria	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
GL1A	0,39	0,59	0,50	0,69	0,41	0,52	0,76	0,63	0,55	0,77	0,46	0,57
T1A	0,30	0,55	0,69	0,62	0,48	0,55	0,74	0,43	0,75	0,74	0,42	0,52
Min.Irid	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
NaviaP	0,63	0,41	0,35	0,43	0,74	0,68	0,73	0,12	0,63	0,71	0,37	0,20
Air 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 27 Matriz de decisión normalizada

Calculando la desviación típica de cada proceso de arranque, los resultados son los siguientes:

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
σ_j	0,37	0,36	0,37	0,37	0,37	0,36	0,38	0,40	0,37	0,38	0,36	0,38

Tabla 28 Desviación típica de cada proceso de arranque

Una vez calculada la matriz de decisión y el valor de la desviación típica, se calcula la matriz simétrica $n \times n$ mediante el coeficiente de correlación lineal. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Proceso	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
S1	1	0,88	0,80	0,83	0,98	0,96	0,85	0,73	0,87	0,84	0,93	0,78
S2	0,88	1	0,97	0,99	0,87	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,98	0,97
S3	0,80	0,97	1	0,96	0,82	0,89	0,90	0,91	0,95	0,90	0,94	0,96
S4	0,83	0,99	0,96	1	0,83	0,91	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,97
S5	0,98	0,87	0,82	0,83	1	0,98	0,90	0,68	0,92	0,89	0,90	0,75
S6	0,96	0,93	0,89	0,91	0,98	1	0,95	0,77	0,97	0,95	0,94	0,83
S7	0,85	0,93	0,90	0,95	0,90	0,95	1	0,78	0,97	1,00	0,88	0,84
S8	0,73	0,94	0,91	0,94	0,68	0,77	0,78	1	0,79	0,80	0,93	0,99
S9	0,87	0,94	0,95	0,94	0,92	0,97	0,97	0,79	1	0,97	0,91	0,86
S10	0,84	0,94	0,90	0,95	0,89	0,95	1,00	0,80	0,97	1	0,89	0,85
S11	0,93	0,98	0,94	0,95	0,90	0,94	0,88	0,93	0,91	0,89	1	0,96
S12	0,78	0,97	0,96	0,97	0,75	0,83	0,84	0,99	0,86	0,85	0,96	1

Tabla 29 Matriz de correlación de coeficientes r_{jk}

Realizando la operación $1 - r_{jk}$, la matriz de conflictos resultante será:

Process	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
S1	0	0,12	0,20	0,17	0,02	0,04	0,15	0,27	0,13	0,16	0,07	0,22
S2	0,12	0	0,03	0,01	0,13	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,02	0,03
S3	0,20	0,03	0	0,04	0,18	0,11	0,10	0,09	0,05	0,10	0,06	0,04
S4	0,17	0,01	0,04	0	0,17	0,09	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,03
S5	0,02	0,13	0,18	0,17	0	0,02	0,10	0,32	0,08	0,11	0,10	0,25
S6	0,04	0,07	0,11	0,09	0,02	0	0,05	0,23	0,03	0,05	0,06	0,17
S7	0,15	0,07	0,10	0,05	0,10	0,05	0	0,22	0,03	0,00	0,12	0,16
S8	0,27	0,06	0,09	0,06	0,32	0,23	0,22	0	0,21	0,20	0,07	0,01
S9	0,13	0,06	0,05	0,06	0,08	0,03	0,03	0,21	0	0,03	0,09	0,14
S10	0,16	0,06	0,10	0,05	0,11	0,05	0,00	0,20	0,03	0	0,11	0,15
S11	0,07	0,02	0,06	0,05	0,10	0,06	0,12	0,07	0,09	0,11	0	0,04
S12	0,22	0,03	0,04	0,03	0,25	0,17	0,16	0,01	0,14	0,15	0,04	0

Tabla 30 Matriz de conflictos

Una vez obtenida la matriz, se calcula la medida del conflicto, la cantidad de información en relación con cada criterio y los pesos objetivos, utilizando las ecuaciones (11), (12) y (13). Los resultados pueden verse en la siguiente tabla.

Proceso	$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk})$	C_j	w_j (%)
S1	1,57	0,59	11,83
S2	0,65	0,23	4,72
S3	0,99	0,37	7,51
S4	0,78	0,29	5,79
S5	1,50	0,56	11,35
S6	0,90	0,33	6,58
S7	1,05	0,40	8,05
S8	1,74	0,70	14,11
S9	0,91	0,34	6,80
S10	1,03	0,39	7,88
S11	0,79	0,28	5,72
S12	1,25	0,48	9,65

Tabla 31 Pesos objetivos

La evolución de los pesos para cada uno de los procesos de arranque de las luminarias puede verse en la siguiente figura.

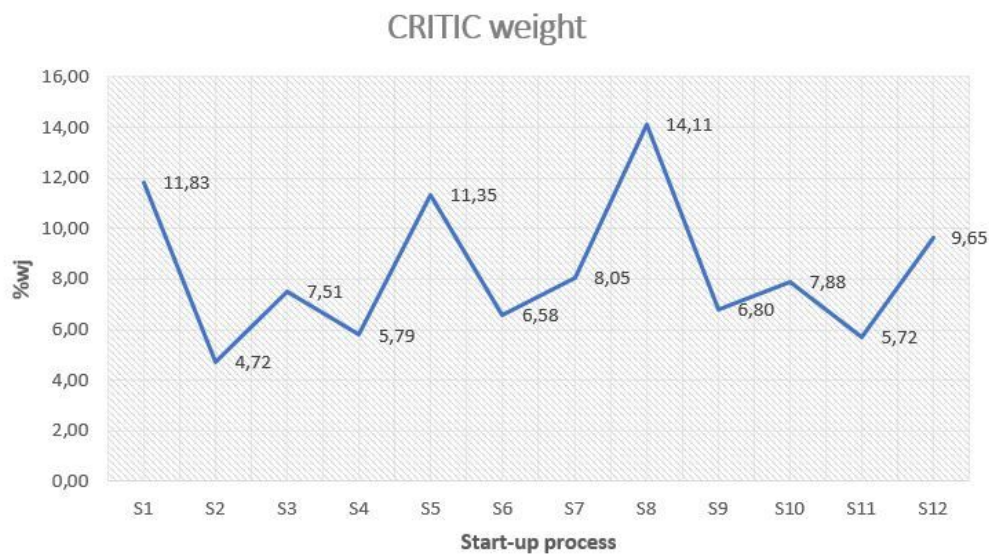


Figura 26 Peso método CRITIC para los procesos de arranque

Como puede observarse en el gráfico anterior, el valor de peso más elevado es 14,11, que corresponde al proceso de encendido número 8. Por lo tanto, las corrientes asignadas a este peso y a este proceso de encendido son las siguientes:

Corriente arranque CRITIC (A)	
Luminaire	S8
GL1A	2,1
T1A	3,1
Mini-Iridium	0,3
NaviaP	4,6
Air 7	5,2

Tabla 32 Corriente de irrupción mediante método CRITIC

4.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado de la Tesis Doctoral se discutirán de forma resumida los principales resultados obtenidos en los estudios que han dado como resultado el presente compendio.

- **DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA EN LA CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA ÚTIL DE LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO**

Una vez validada la simulación a 20°C en el laboratorio, se realizará un análisis de la temperatura de unión de los LED (T_j) para estudiar cómo afecta al rendimiento lumínico.

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

La obtención de la temperatura de unión de los LED en las simulaciones para las diferentes condiciones de contorno que rodean a la luminaria, tales como 40°C, 20°C y -10°C, se comparará con las temperaturas de unión de los LED que se encuentran en el mercado.

	Temperatura ambiente externa de la simulación (°C)	Temperatura de unión LED T_j (°C)
Temperatura 1	40	135
Temperatura 2	20	117
Temperatura 3	-10	86

Tabla 33 Temperaturas de unión de los LED obtenidas en las simulaciones (T_j). Fuente: elaboración propia

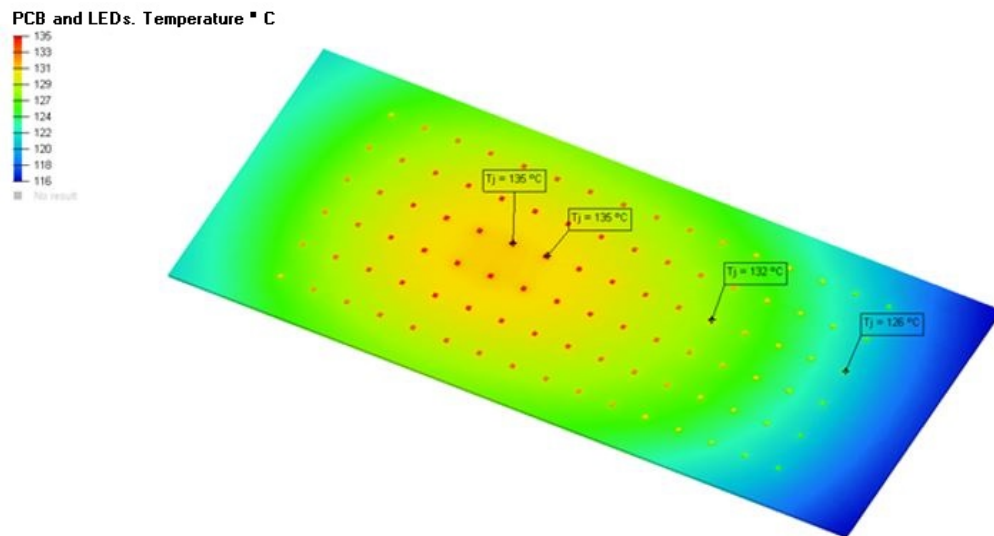


Figura 27 Resumen de las temperaturas de unión de los LED durante la simulación a temperatura ambiente de 40°C. Fuente: elaboración propia

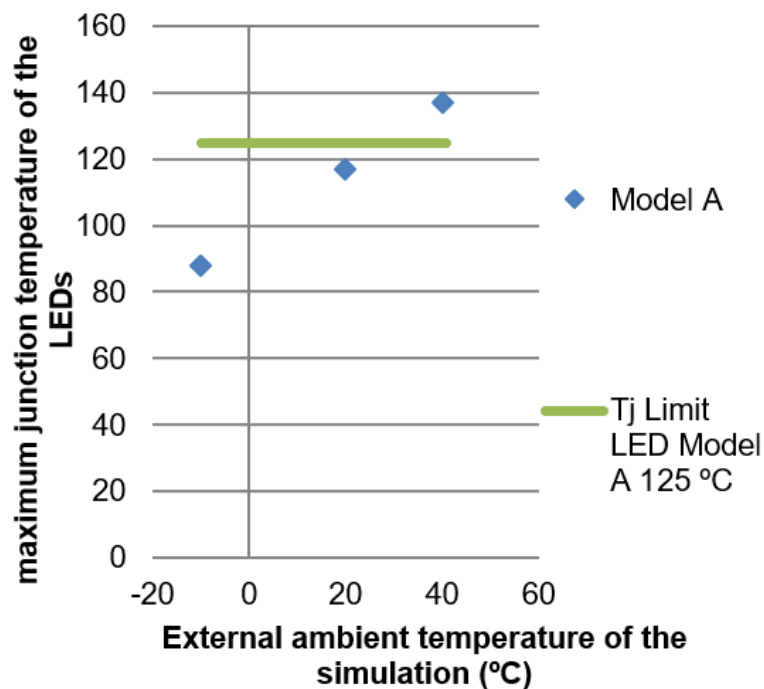


Figura 28 Variación de la temperatura máxima de unión de los LED con respecto a la temperatura ambiente de la simulación, marcando la temperatura límite de unión de cada LED. Fuente: Elaboración propia

Para el modelo, se utilizó un LED Osram LUW CQAR (streetwhite) con su respectiva hoja de datos. Se ha optado por tener en cuenta las dimensiones del LED con la potencia de 2W / LED y, por tanto, tener una orientación para las características. La temperatura máxima de la unión de este LED corresponde a una temperatura de 135°C. En esta luminaria, la temperatura máxima alcanzada es de 10°C por encima del valor de la temperatura de la unión del LED, lo que provocará una disminución de la vida útil de la lámpara, posiblemente haciendo que la potencia luminosa del LED disminuya irreversiblemente a largo plazo, a un ritmo más rápido que a temperaturas más bajas [84]. El control de la temperatura de los LED es, por tanto, uno de los aspectos más importantes para el rendimiento óptimo de los sistemas LED [1].

En los gráficos siguientes puede observarse cómo varían con la temperatura de unión importantes parámetros de los LED que figuran en la hoja de datos facilitada por el fabricante. La figura 28 muestra cómo decae el flujo luminoso a medida que aumenta la temperatura de unión. Para la temperatura de unión a temperatura ambiente de 20°C, que es de 117°C, los LED presentan una disminución del flujo luminoso del 20%. Al aumentar la temperatura de unión del LED, disminuye la potencia que el ojo humano percibe como luz.

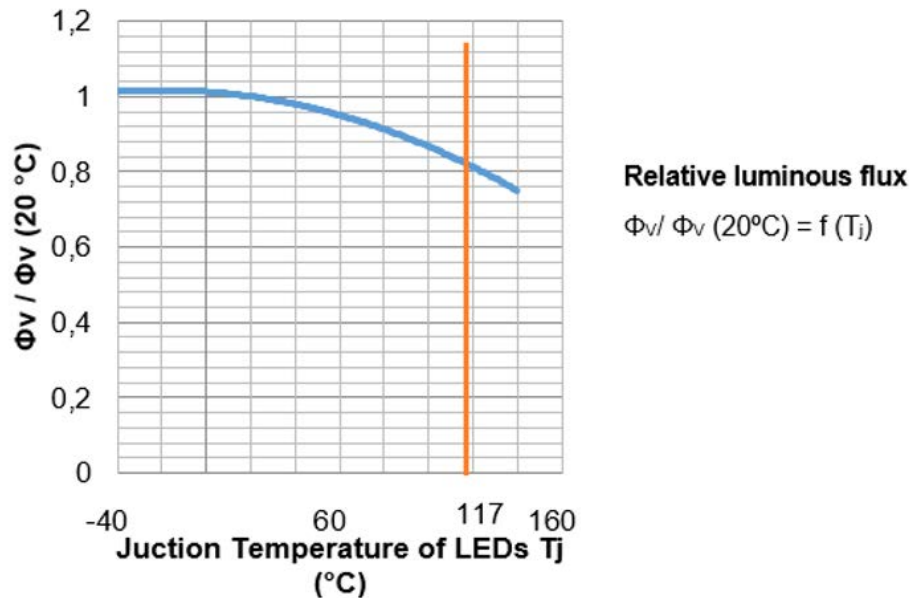


Figura 29 Temperatura de unión de los LED (T_j) frente al flujo luminoso. Fuente: elaboración propia y hoja de datos LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

La figura 29 muestra la variación de las coordenadas de cromaticidad con respecto al cambio de la temperatura de unión. Para la temperatura de unión a temperatura ambiente de 20°C en la que se encuentran los LED del modelo (línea verde de la figura 29), se muestra la variación de las coordenadas de cromaticidad.

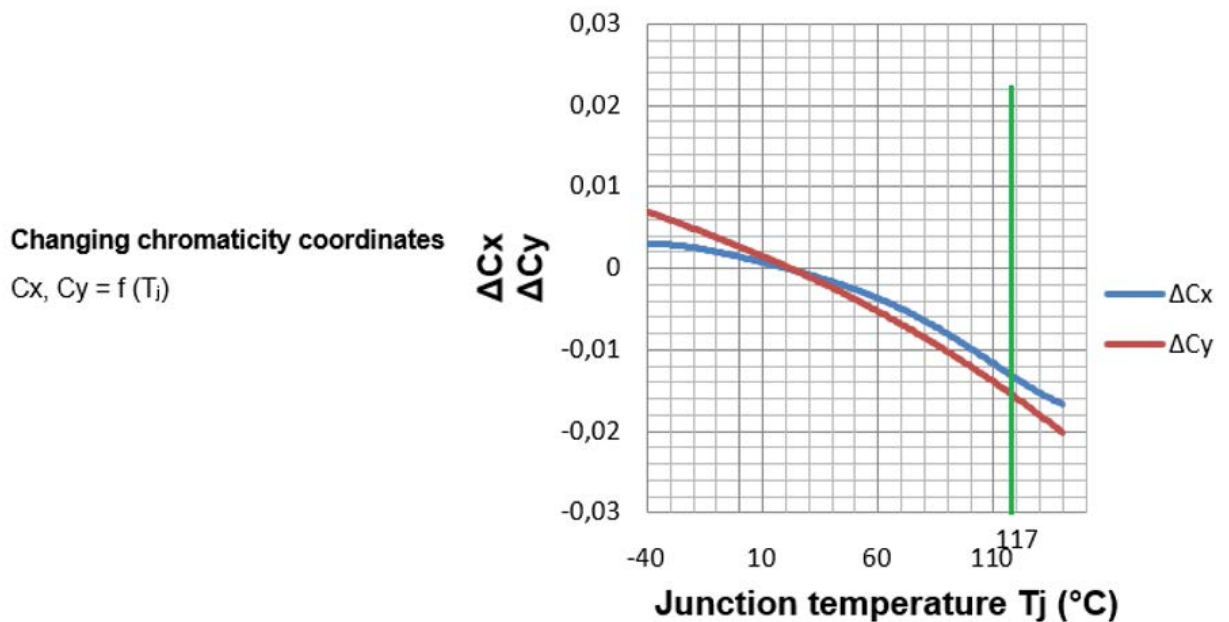


Figura 30 Temperatura de unión (T_j) vs Cambio de coordenadas cromáticas. Fuente: elaboración propia y hoja de datos LED Osram LUW CQAR (streetwhite)

La variación de la temperatura de unión del LED hace que cambien las coordenadas de cromaticidad. Observamos como la calidad del color de la luz empeora. Para la temperatura de unión correspondiente a 20°C de temperatura ambiente, que es de 117°C, la variación de la cromaticidad varía provocando una disminución de la calidad del color de la luz del LED, desplazándose en el diagrama de cromaticidad en torno al 15%.

Los datos teóricos y experimentales varían muy poco comparativamente, en la Figura 30. De esta forma podemos comprobar que a partir de las técnicas de simulación podemos obtener una aproximación muy real a los resultados de funcionamiento del modelo sin necesidad de construir el prototipo. Las técnicas de simulación de disipación térmica permiten obtener información muy precisa, siempre ligada a la precisión de la geometría del diseño y de los materiales, tan fundamental para que los resultados sean lo más exactos posibles.

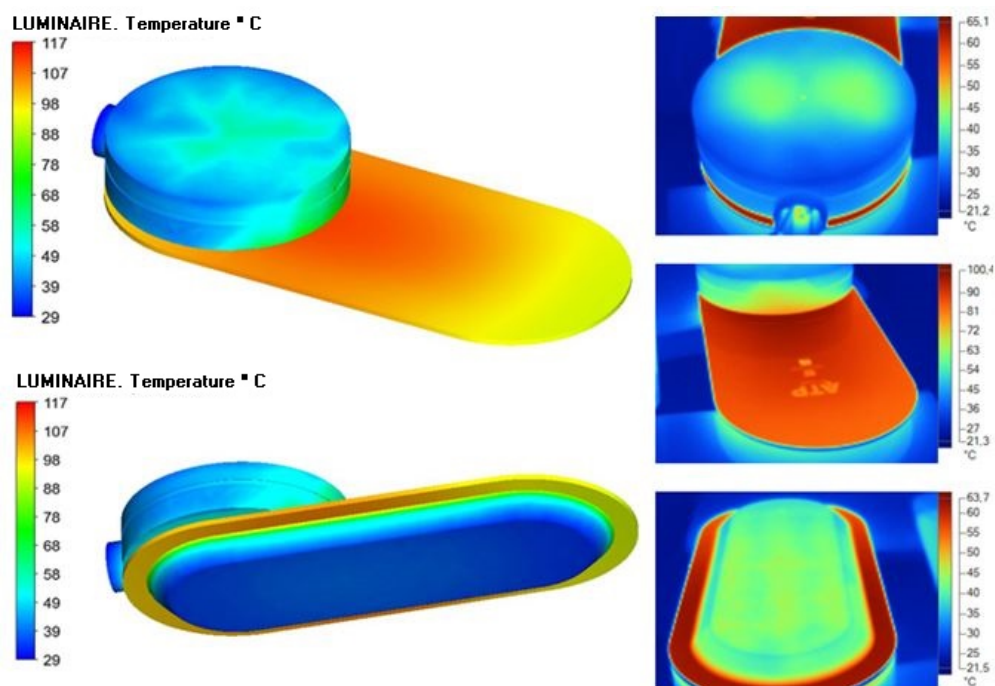


Figura 31 Datos teóricos comparativos (izquierda) y datos experimentales (derecha). Fuente: Elaboración propia a partir del software Hyperview y SmartView 4.1.

A la hora de favorecer la disipación de calor, el disipador es el componente más importante para reducir la temperatura de unión. La mayoría de los disipadores están diseñados con aletas para aumentar su superficie de contacto con el aire y disipar más calor [85]. Será necesario mejorar el diseño de los componentes de la luminaria para facilitar la disipación de calor y favorecer el paso de aire a través del disipador de las luminarias para disminuir la temperatura de los dispositivos electrónicos. Para mejorar la refrigeración, se podrían incorporar sistemas auxiliares de ventilación, para mejorar el flujo de aire del interior y salir al exterior.

Uno de los principales problemas de las luminarias LED de alta potencia es el calor generado en su interior. La distribución de los LED y el efecto del número de LED encendidos afectan a la temperatura de unión y participan en gran medida en la degradación del LED [86]. La mayoría de las luminarias contienen disipadores de

aluminio como solución. Actualmente, se están investigando materiales con nuevas aleaciones y formulaciones para una disipación térmica eficaz. Por ejemplo, se ha desarrollado el nitrato de aluminio para aplicarlo como capa fina en los disipadores, que presenta ciertas ventajas sobre los dieléctricos convencionales basados en polímeros o sustratos cerámicos, como una excelente disipación térmica y una baja resistencia térmica [87]. El tema de la disipación térmica está a la orden del día, se están investigando materiales para ser utilizados como disipadores de calor que promuevan una mayor durabilidad de los LED debido a una mejora en la disipación térmica [88].

- **DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE O IRRUPCIÓN EN LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO BASADAS EN MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO**

Se analizaron los resultados obtenidos para cada luminaria y proceso de puesta en marcha, comparándolos con los dos métodos.

La primera comparación serán las ponderaciones objetivas obtenidas de la aplicación de los métodos ENTROPÍA y CRITIC para cada uno de los doce procesos de arranque ensayados en las luminarias LED. Como se puede observar en la Figura 31, los procesos de arranque donde existe una mayor diferencia de pesos son S1 y S8, y por otro lado donde existe una menor diferencia de pesos es en los procesos S3 y S11.

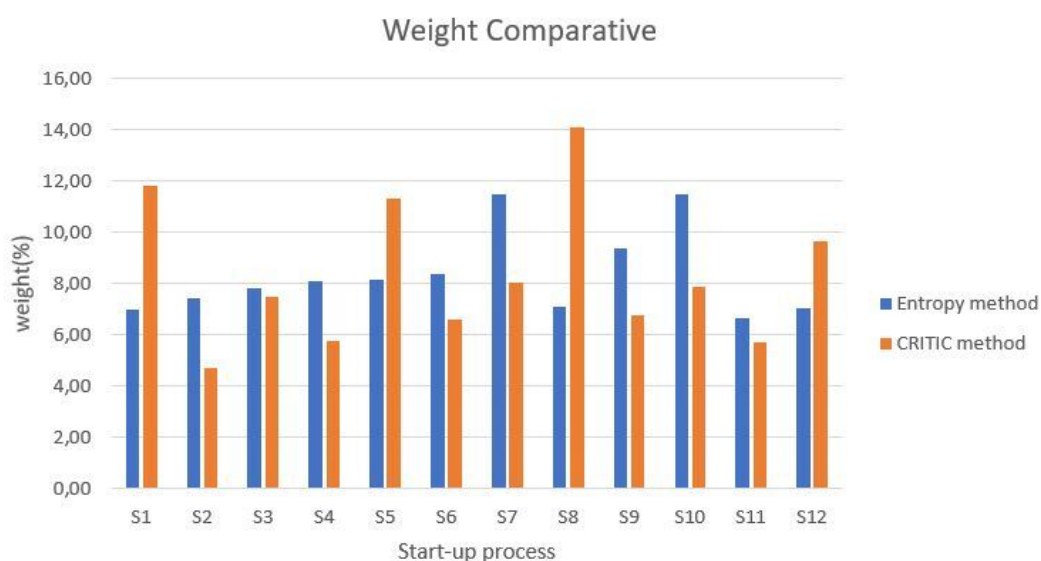


Figura 32 Comparativa de pesos en procesos de arranque

Por tanto, se puede deducir que en los procesos S3 y S11 los dos métodos de análisis tienen la mayor convergencia y en los procesos S1 y S8 la mayor divergencia. La similitud entre las ponderaciones de ambos métodos se debe a que los procesos de arranque S3 y S11 tienen valores muy próximos entre sí en la corriente de arranque, como se puede observar en la matriz de decisión.

De este gráfico también se deduce que cuanto mayor es el valor de ponderación indica que el parámetro muestra un menor grado de variabilidad en la corriente de irrupción. Por esta razón, el método de la entropía da S10 y el método CRITIC da S8 como los mejores procesos de arranque.

La comparación de corriente entre los dos métodos se muestra en la tabla 29 y en la figura 32.

Luminaria	Corriente Arranque Entropía (A)	Corriente Arranque CRITIC (A)
	S10	S8
GL1A	2,1	2,1
T1A	2,3	3,1
Mini-Iridium	0,3	0,3
NaviaP	2,5	4,6
Air 7	8	5,2

Tabla 34 Corriente de arranque Entropía vs método CRITIC

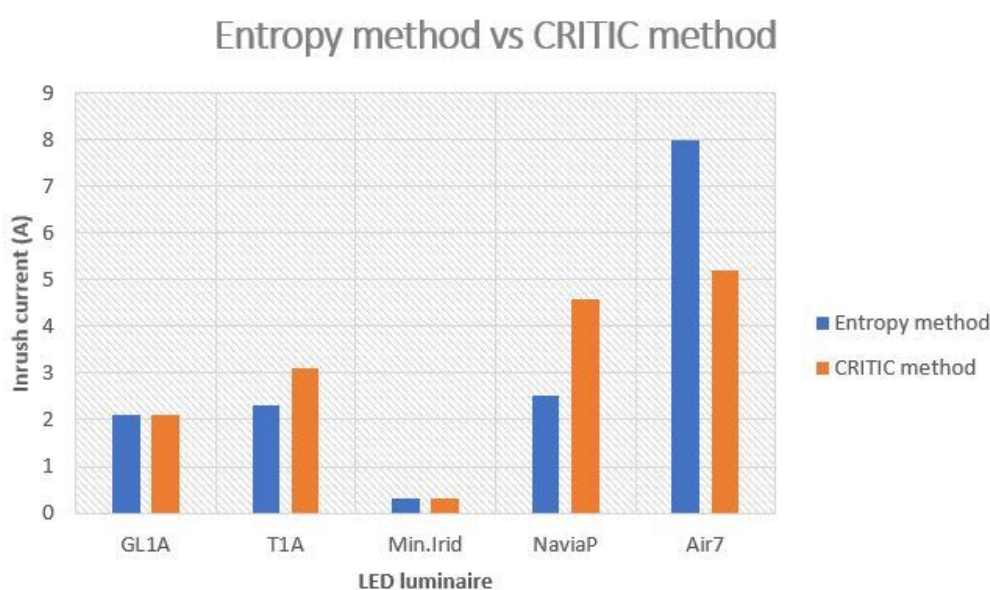


Figura 33 Comparación de la corriente de arranque

Un dato muy importante que podemos deducir del gráfico anterior es que el método CRITIC es más restrictivo y, por tanto, más severo a la hora de evaluar la corriente de irrupción ya que en todas las luminarias excepto en Air 7 la corriente es superior que utilizando el método de entropía.

Este resultado es muy importante porque se pueden combinar ambos métodos para una evaluación más precisa, optando por tomar las corrientes más severas obtenidas en cada luminaria como resultado final del estudio.

La tabla 30 y la figura 33 muestran la predicción de corriente de la combinación de ambos métodos.

Predicción de corriente de irrupción	
Luminaria	Corriente (A)
GL1A	2,1
T1A	3,1
Mini-Iridium	0,3
NaviaP	4,6
Air 7	8

Tabla 35 Predicción final corriente de irrupción

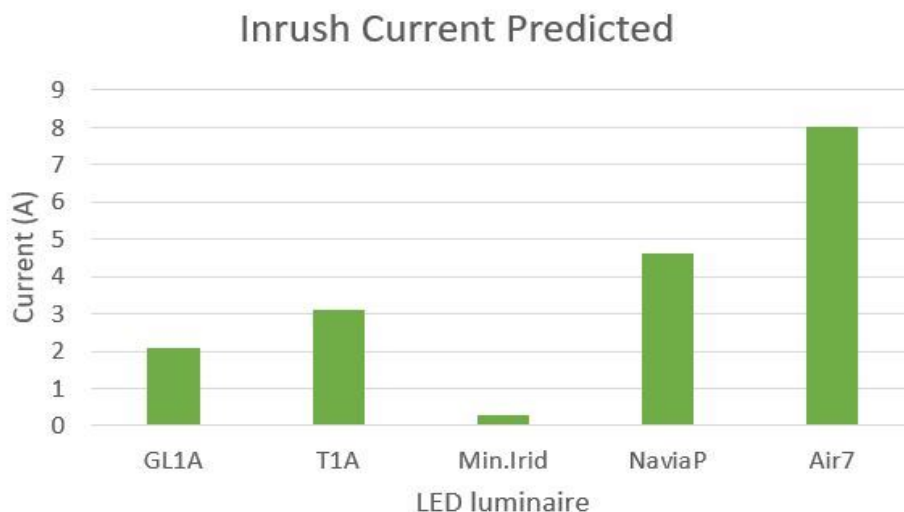


Figura 34 Predicción de corriente de irrupción

Ambos métodos de decisión multicriterio (entropía y CRITIC) son enfoques utilizados en el análisis multicriterio para tomar decisiones en situaciones complejas. Estos métodos difieren en su planteamiento y aplicación, lo que implica distintas implicaciones en su uso.

1. **Enfoque de medición:** El método de la entropía se basa en la teoría de la información y utiliza medidas de entropía para cuantificar la incertidumbre o dispersión de los valores de los criterios. El método CRITIC se centra en la correlación entre criterios y trata de determinar la importancia relativa de cada criterio en función de su relación con otros criterios.
2. **Aplicación:** El método de la Entropía es adecuado para situaciones en las que el objetivo es seleccionar los criterios más informativos y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones. El método CRITIC es útil cuando se desea evaluar la importancia relativa de los criterios en función de su relación entre sí, lo que puede ser relevante en contextos en los que los criterios están interconectados o pueden influirse mutuamente.

Por estas razones, la combinación de utilizar el método más severo en cada caso conduce a una aproximación más realista de la predicción de la corriente de arranque, ya que la combinación de ambos métodos busca reducir la incertidumbre en la toma de decisiones y evaluar la importancia relativa de los procesos de arranque en términos de su relación entre sí.

4.6 CONCLUSIONES FINALES

Aunque actualmente es un hecho que la tecnología LED aplicada al alumbrado urbano, es la forma más eficiente y económica de iluminación de nuestras calles y ciudades, presenta algunos problemas relacionados con la disipación térmica que afectan a la calidad lumínica de las luminarias, así como problemas asociados a la calidad de energía en relación con la corriente de arranque, que afectan a determinados componentes de los circuitos eléctricos si no se tiene una predicción aproximada de este fenómeno eléctrico, que se produce en el circuito cada vez que se arranquen las luminarias LED.

En el presente apartado de la Tesis Doctorales se expondrán las principales conclusiones de los dos problemas planteados en el inicio de la presente investigación.

- ***CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA EN LA CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA ÚTIL DE LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO***

Con este estudio se pretende presentar una metodología analítica para calcular la disipación térmica de luminarias LED, previamente, en fase de diseño. El método se ha validado comparando los resultados de las simulaciones térmicas teóricas a partir de un modelo de luminaria previamente diseñado, con los datos experimentales obtenidos en laboratorio.

La metodología propuesta permite realizar la simulación en la fase de diseño de las luminarias LED, antes de lanzarse a la fase de construcción del prototipo. Permitiendo analizar y experimentar con el modelo en un entorno virtual, reduciendo los requerimientos de tiempo y coste asociados a las pruebas realizadas.

Este estudio tiene por objeto el análisis térmico preliminar de luminarias LED, para verificar el diseño y los materiales de las luminarias y comprobar la temperatura de los LED y su repercusión de cara al buen funcionamiento de los diodos emisores de luz.

Se observa que la influencia de la temperatura de unión de los LED, es una cuestión crítica de la fase de diseño que puede afectar seriamente a la funcionalidad de la luminaria y causando una variación de las propiedades lumínicas de los LED, como disminución del flujo lumínico y cambio en las coordenadas de cromaticidad.

Todos los dispositivos y circuitos electrónicos generan un exceso de calor y requieren una mayor atención para evitar fallos prematuros. Los LED convierten el 45% de la energía aplicada en luz y el 55% restante en calor, este calor debe ser disipado, utilizando un diseño y materiales adecuados para que la durabilidad y propiedades de los LED no se vean afectadas por el aumento de temperatura [17]

Las simulaciones térmicas proporcionan información sobre la temperatura y el flujo de aire en el interior del equipo, permitiendo a los ingenieros diseñar sistemas de refrigeración para optimizar el diseño y reducir el consumo de energía, el peso y el coste y verificando que no hay problemas cuando se construye el equipo. En este trabajo hemos utilizado software de simulación térmica aplicando técnicas de dinámica de

fluidos computacional (CFD) para predecir la temperatura y el flujo de aire de un sistema electrónico [66].

Un buen diseño de la luminaria donde se favorezca la circulación de aire en beneficio de la disipación de la temperatura de unión de los LED favorecerá la vida útil y mejorará la eficiencia lumínica y la fiabilidad de los LED teniendo mejores propiedades lumínicas. Aparte del diseño, una buena selección de materiales para los componentes de la luminaria donde la conductividad térmica sea alta favorece la disipación térmica de la luminaria.

Es fundamental abordar y tratar de mitigar los problemas de sobrecalentamiento de las luminarias LED asociados a una mala disipación del calor, ya que acaban afectando a la calidad de la luz, la cromaticidad y la temperatura de color, impactando directamente en la vida útil de las luminarias y en la salud de los usuarios al alterar los ritmos circadianos. Por ello, es fundamental diseñar equipos de iluminación que permitan una alta disipación térmica [89]. Este trabajo propone una metodología para el investigador científico que satisfaga la necesidad futura de diseñar luminarias con tecnología LED que sean sostenibles para el medio ambiente, seguras para la salud humana, fiables y duraderas, avaladas por los resultados contrastados obtenidos.

- ***CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE LA CORRIENTE DE ARRANQUE O IRRUPCIÓN EN LUMINARIAS LED APLICADAS AL ALUMBRADO URBANO BASADAS EN MÉTODOS DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO***

En el presente estudio se ha desarrollado una técnica novedosa que proporciona una determinación conjunta precisa de la corriente de irrupción en luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano. La innovación más importante es que el proceso incluye la estimación de la corriente de irrupción mediante la combinación de métodos de toma de decisiones multicriterio.

Los resultados obtenidos de la aplicación de ambos métodos permiten predecir la corriente de irrupción de las luminarias antes de su instalación en las carreteras y calles de las ciudades. Se ha demostrado el potencial de los métodos de decisión multicriterio, ya que la predicción de la corriente permite un importante ahorro económico en cuanto al correcto dimensionamiento de elementos de maniobra como cables o de protección como interruptores o protecciones diferenciales.

Aunque la tecnología LED es la forma de iluminación más económica y energéticamente eficiente, a lo largo de este estudio se ha demostrado que existen problemas relacionados con la calidad de la energía, como la corriente de irrupción, que es un parámetro clave en el correcto funcionamiento tanto de las lámparas como del circuito eléctrico. Por lo tanto, una correcta evaluación de esta corriente permitirá un mejor conocimiento del sistema y una importante anticipación a futuros problemas eléctricos.

Este estudio ha demostrado que el uso del método de la entropía y del método CRITIC son técnicas útiles para mejorar la comprensión de los problemas de calidad de la energía en relación con las luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano.

A continuación, se expondrán de forma resumida las principales conclusiones a las que se ha llegado según los estudios realizados en la presente Tesis Doctoral.

PRIMERA CONCLUSIÓN:

Ha quedado demostrado, que la temperatura de unión T_j de los diodos emisores de luz (LED) es el principal factor a minimizar durante las horas de funcionamiento de las luminarias, puesto que, en las gráficas de flujo lumínico vs temperatura de unión y variación de coordenadas cromáticas vs temperatura de unión, se observa como es un parámetro crítico desplazando tanto el flujo como las coordenadas de color un 20% y un 15% respectivamente en las condiciones de trabajo estudiadas, afectando inevitablemente a las condiciones de visibilidad de los seres humanos, a lo largo de su vida útil.

SEGUNDA CONCLUSIÓN:

La temperatura de unión T_j está afectada también por la disipación térmica del calor que se produce en el interior de la luminaria, aparte del diseño utilizado para la construcción del LED. En la fase de diseño de la luminaria, mediante el uso de la simulación con CFD, se ha demostrado como se puede conocer a priori este parámetro clave y como cambiando los materiales de los que se construye el disipador se puede prever la modificación de los parámetros (flujo lumínico y coordenadas de cromaticidad), ahorrando en tiempo y coste en la fabricación de los prototipos.

TERCERA CONCLUSIÓN:

La corriente de arranque o irrupción es un parámetro relacionado con la calidad de energía, que en la actualidad no existen métodos para una estimación o aproximación en luminarias LED aplicadas al alumbrado urbano. Mediante este estudio se ha propuesto una metodología innovadora que combina dos métodos de toma de decisiones multicriterio y que proporciona una determinación conjunta de la corriente de arranque de forma precisa.

CUARTA CONCLUSIÓN:

El fenómeno de la corriente de irrupción en luminarias LED, no se puede eliminar, debido a la propia naturaleza electrónica de las mismas, pero mediante la metodología propuesta en la presente Tesis Doctoral se puede controlar y estimar este parámetro. Esto lleva a conocer de antemano en la fase previa al montaje la dimensión de este fenómeno físico, implicando una anticipación en el futuro a problemas eléctricos que puedan derivar de este parámetro, así como ahorro económico en el dimensionamiento de componentes eléctricos del circuito.

4.7 REFERENCIAS A CAPÍTULOS DE LIBRO Y COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES

Como complemento a los dos artículos científicos en los que se ha basado la presente Tesis Doctoral, se han publicado dos capítulos de libro y comunicaciones a Congresos Internacionales que están estrechamente relacionadas con los dos artículos JCR publicados y que forman parte del presente compendio.

Estos capítulos de libro y comunicaciones a Congresos Internacionales son los siguientes:

- **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CORRIENTE DE IRRUPCIÓN Y LA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS EN LA SUSTITUCIÓN DE LÁMPARAS INCANDESCENTES POR LUMINARIAS LED EN EL ALUMBRADO URBANO**

Esta comunicación ha sido presentada en el Congreso Internacional sobre Agua, Energía, Alimentación y Sostenibilidad (ICoWEFS), celebrado del 10 al 12 de mayo de 2022, en Portalegre, Portugal.

El objetivo de este trabajo es estudiar y comparar los dos parámetros clave en los problemas relacionados con la calidad de energía, como la corriente de irrupción y la generación de armónicos en diferentes tecnologías de alumbrado público. Se estudiaron estos dos parámetros y cómo pueden utilizarse para predecir o estimar la sección de cableado de los circuitos o el número de mecanismos de protección de sobrecorriente adecuados que deben instalarse para una correcta sustitución.

Se analizaron 7 luminarias aplicadas al alumbrado urbano, de las cuales 5 eran de tecnología LED, y los dos últimos restantes de Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP) y Halogenuro Metálico (HM). Las características de estos equipos se sintetizan en la siguiente tabla:

Luminaria	Tecnología	Potencia	Tensión Entrada	Factor Potencia	Fuente de luz
LEDUS LGL1AS	LED	60W	AC 90-305V	0,95	Philips-Lumileds
LEDUS LRLT1A	LED	80W	AC 90-305V	0,95	Philips-Lumileds
Mini Iridium	LED	20W	AC 220-240V	0,95	Philips-Lumileds
NaviaP Solydi	LED	50W	AC 100-300V	0,95	CREE Xlamp XT-E
ATP Air 7	LED	200W	AC 100-240V	0,95	OSRAM LUW CQAR
VSAP	Descarga	250W	AC 100-240V	0,97	SON-T E40 1SL
HM	Descarga	100W	AC 100-240V	0,97	CDO-TT Plus E40

Tabla 36 Tabla de especificaciones técnicas luminarias urbanas ensayadas

La metodología de estudio seguida es la siguiente:

1. El estudio de los fenómenos eléctricos de las farolas consistió en cuatro días de análisis de cada una de las siete luminarias. Cada día de análisis se estructuró

en seis intervalos de medida para cada luminaria. Dentro de cada intervalo de medida, distinguimos dos tipos de arranque que pueden existir en una luminaria:

- a) *Arranque en frío*: Se denomina así al tipo de arranque que se produce en las luminarias tras un largo periodo de no funcionamiento, normalmente este periodo de no funcionamiento suele ser de varias horas. Se considera que el arranque en frío de una luminaria dura hasta que ésta alcanza su régimen permanente, en cuanto a fenómenos eléctricos se refiere.
 - b) *Arranque en caliente*: Se denomina así al tipo de arranque que se produce en las luminarias tras un corto periodo de no funcionamiento, normalmente este periodo de no funcionamiento suele durar unos minutos. Se considera arranque en caliente de la luminaria cuando ha transcurrido un corto periodo de tiempo desde el arranque anterior.
2. Los datos recogidos se utilizaron para calcular los parámetros estadísticos de ambas tecnologías y, a continuación, se compararon los resultados. Con estos resultados, fue posible evaluar la corriente de irrupción y la generación de armónicos en el circuito y, finalmente, extraer conclusiones de este estudio.

A modo de discusión y resultados la primera comparación que se realizó fue la de la corriente de pico en cada tipo de encendido. Se compararon los valores medios de la corriente de arranque en cada situación (arranque en frío y arranque en caliente).

Además, para calcular la severidad de estas corrientes de arranque en cada caso, se ha calculado un factor de pico que simboliza el número de veces que la corriente de pico supera el valor RMS (Root Mean Square) nominal del consumo de corriente en cada luminaria, y se define de la siguiente forma:

$$\text{Factor pico} = \frac{\text{Inrush current}}{I_{RMS}} \quad (14)$$

La comparación de los resultados medios muestra que el factor de pico es mayor en el arranque en frío que en el arranque en caliente. Puede observarse en la siguiente tabla:

Corriente media arranque (A)	Arranque frío	Arranque caliente	I _{RMS} frío	I _{RMS} caliente	Factor pico arranque frío	Factor pico arranque caliente
LEDUS LGL1AS	2,73	3,12	0,23	0,27	12,1	11,5
LEDUS LRLT1A	3,55	3,07	0,30	0,30	11,8	10,2
Philips M-Irid	0,30	0,30	0,10	0,10	3	3
NaviaP Solydi	4,30	3,21	0,20	0,20	21,5	16
ATP Air 7	5,40	6,03	0,80	0,80	6,8	7,5
VSAP	6,65	5,54	1,43	1,37	4,6	4,0
HM	4,27	5,54	0,50	0,50	8,5	11,1

Tabla 37 Comparación de la corriente de arranque media.

Esta comparación es muy interesante, ya que las lámparas de descarga apenas tienen componentes electrónicos o fuentes electrónicas que controlen la luminaria, por lo que no tienen una gran corriente de pico con respecto a su valor nominal en el circuito eléctrico como la mayoría de las luminarias LED, como se muestra en la Tabla 32.

La segunda y última comparación que se realizó fue la de la distorsión armónica total de corriente. Se comprobaron los valores medios de generación armónica producidos por cada luminaria y la diferencia entre arranque en frío y arranque en caliente, tal y como se muestra en la tabla 33.

THD media (%)	Arranque frío	Arranque caliente
LEDUS LGL1AS	11,13	11,21
LEDUS LRLT1A	8,08	8,17
Philips M-Irid	13,90	14,52
NaviaP Solydi	13,50	13,76
ATP Air 7	6,10	6,22
VSAP	33	35,01
HM	10,23	10,19

Tabla 38 Distorsión armónica total media (THD)

La tabla 33 muestra que, para todas las luminarias, excepto para la luminaria de descarga HM, la mayor generación de armónicos se produce en el encendido en caliente en lugar del encendido en frío, pero con diferencias muy pequeñas entre THD en frío y THD en caliente para todas las luminarias, lo que nos permite afirmar que la generación de armónicos es independiente del tipo de encendido de la luminaria.

Por último, otro dato interesante a observar en la tabla 33, la lámpara de descarga HM, a pesar de utilizar tecnología de descarga, se comporta armónicamente mejor que todas las luminarias que utilizan tecnología LED, excepto la ATP Air 7, lo que nos permite afirmar que su balasto de arranque filtra bien los armónicos de corriente producidos durante el funcionamiento.

A modo de conclusión se puede extraer las siguientes ideas del estudio comparativo realizado:

El arranque en frío de los LED multiplica peligrosamente la corriente nominal. La causa podría ser que los condensadores del driver se cargan o descargan en función del instante de arranque. El problema se hace aún más evidente y pronunciado si suponemos el caso real de un circuito de encendido compuesto, por ejemplo, por 100 luminarias LED. Si todas ellas se ponen en marcha al mismo tiempo, existe el riesgo de que la protección contra sobrecorriente se dispare automáticamente e impida que el sistema se encienda con normalidad.

Se proponen dos soluciones para el arranque en frío de las luminarias LED, una de ellas muy barata ya que tiene poco impacto en términos económicos y la otra más cara ya que implica una evolución tecnológica del driver: la primera solución y más barata para resolver este problema es arrancar de forma sincronizada los distintos circuitos del cuadro eléctrico para no superar la corriente máxima soportada por los disyuntores, y la segunda solución y más cara es diseñar un circuito de arranque suave en los drivers de las luminarias.

Analizando el arranque en caliente, la situación más peligrosa se produce cuando las luminarias arrancan con una corriente de pico máxima, ya que el factor multiplicador de corriente es muy elevado. Este caso es muy común ya que se produce por diversos factores como la caída de un rayo, un corte de suministro eléctrico, etc. Se produce una desconexión y los cuadros con dispositivos rearmables volverían a conectarse y ahora el peligro es que aparezcan estas corrientes de pico, ya que podrían provocar una segunda desconexión o una cadena de desconexiones que impedirían un encendido normal, entonces las soluciones aplicables, como hemos explicado anteriormente son el arranque sectorizado de cada uno de los circuitos o instalar un driver programable en cada una de las luminarias para subsanar estos problemas.

En cuanto a la distorsión armónica, de los resultados de este estudio se puede concluir que la emisión armónica de las lámparas LED será superior a la de las lámparas de incandescencia, que consumen una corriente cercana a la sinusoidal cuando son alimentadas por una onda de tensión sinusoidal, Además, también se ha comprobado que en cada una de las luminarias existe prácticamente la misma distorsión armónica tanto en arranque en frío como en arranque en caliente, lo que nos permite afirmar que la generación de armónicos es independiente del tipo de arranque al que se someta la luminaria y dependiente de su driver electrónico.

La elevada generación de armónicos es peligrosa para los componentes que integran el sistema, ya que puede provocar el calentamiento de los conductores. Para solucionar este problema, se propone un driver capaz de filtrar los armónicos más altos en las frecuencias en las que aparecen, con el inconveniente de aumentar el precio de la luminaria.

Esta comunicación a Congreso Internacional está relacionada, como se ha podido comprobar, con el artículo 2 del presente compendio.

(Artículo 2: Evaluation of Inrush Current in LED Luminaires Applied to Urban Lighting Based on Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study)

- **EFFECTOS DE LA DISIPACIÓN TÉRMICA EN LA CALIDAD DE LA LUZ Y LA VIDA ÚTIL DE LUMINARIAS LED Y LUMINARIAS DE DESCARGA**

Esta comunicación ha sido presentada en el XXVI Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos, celebrado del 5 al 8 de julio de 2022, en Terrassa, Barcelona.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio exhaustivo del impacto de la disipación térmica en el comportamiento lumínico de luminarias LED comparativamente con las de descarga. En las luminarias LED, es clave mantener la temperatura de disipación térmica de los diodos emisores de luz, dentro de un rango de operación. Las altas temperaturas en los componentes electrónicos no son siendo fundamental disipar el calor generado.

Se analizaron 7 luminarias aplicadas al alumbrado urbano, de las cuales 5 eran de tecnología LED, y los dos últimos restantes de Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP) y Halogenuro Metálico (HM). Las características de estos equipos se sintetizan en la siguiente tabla:

Luminaria	Tecnología	Potencia	Flujo lumínico	Temp color
LEDUS LGL1AS	LED	60W	6000lm	6000K
LEDUS LRLT1A	LED	80W	8000lm	6000K
Philips Mini Iridium	LED	20W	4321lm	4000K
NaviaP Solydi	LED	50W	5450lm	5500K
ATP Air 7	LED	200W	28284lm	4500K
VSAP	Descarga	250W	28000lm	2000K
HM	Descarga	100W	10500lm	2800K

Tabla 39 Tabla de especificaciones técnicas de luminarias

La metodología de estudio seguida es la siguiente:

Se ha realizado un estudio experimental de la disipación térmica de varias luminarias, tanto de tecnología LED como de descarga, analizado los datos obtenidos a través de una cámara termográfica. Los datos se tomaron de manera periódica, durante 8h simulando condiciones reales de funcionamiento, hasta que la temperatura se ha mantenido estable, pasando un tiempo desde su conexión a la red eléctrica.

Posteriormente se analizaron los datos para comprobar si se producía una disipación térmica segura, es decir, que la temperatura máxima de disipación no sobrepasara la temperatura límite del material más restrictivo de lo que se componen cada una de las luminarias estudiadas.

1. El estudio de los fenómenos de disipación térmica de las farolas consistió en dos días de análisis de las siete luminarias. La iluminación LED y las tecnologías de descarga se probaron durante ocho horas y hubo trece intervalos de medición de datos, que se desglosan en:
 - a) *Estado de transición*: La temperatura evoluciona rápidamente en comparación con el tiempo, este estado se caracteriza por un rápido aumento de la temperatura en cada una de las luminarias de calle.
 - b) *Estado estacionario*: La temperatura evoluciona lentamente y apenas se produce aumento de temperatura en cada una de las luminarias. En este estado la luminaria alcanza su temperatura máxima de funcionamiento.
2. Los datos recogidos se utilizaron para dibujar la curva característica de disipación de calor de cada luminaria y, a continuación, se compararon los resultados. Con estos resultados, fue posible evaluar el rendimiento de disipación de cada tipo de tecnología y, finalmente, extraer conclusiones de este estudio.

A modo de discusión y resultados se ha realizado un estudio experimental de la disipación térmica de siete luminarias, tanto de tecnología LED como de descarga, y se han analizado los datos obtenidos mediante una cámara termográfica FLUKE TI 25 en el laboratorio de iluminación y domótica de la Universidad de Jaén.

Al realizar las mediciones del disipador con la cámara termográfica y tratarse de un material específico con una determinada aleación o formulación en el compuesto del material, se han utilizado varios tipos de emisividades para obtener la temperatura exacta.

La temperatura máxima del disipador y de la carcasa de cada una de las luminarias urbanas se midió en condiciones de funcionamiento reales simuladas en una sala totalmente opaca. Los datos se tomaron de forma continua desde el encendido del equipo hasta que se alcanzó la estabilización térmica. Con los datos recogidos se realizó la curva de disipación térmica de cada una de las luminarias y se compararon entre sí. El primer paso fue analizar si se producía una disipación térmica segura, que la temperatura máxima de disipación no superase la temperatura límite del material más restrictivo del que está fabricada cada una de las luminarias.

Con el fin de observar la curva de disipación térmica de unas luminarias frente a otras y comprobar la influencia de la potencia de la luminaria en la temperatura máxima de disipación, se ha realizado un gráfico para su comparación, mostrando todas las curvas de evolución de la temperatura, representadas en un mismo gráfico.

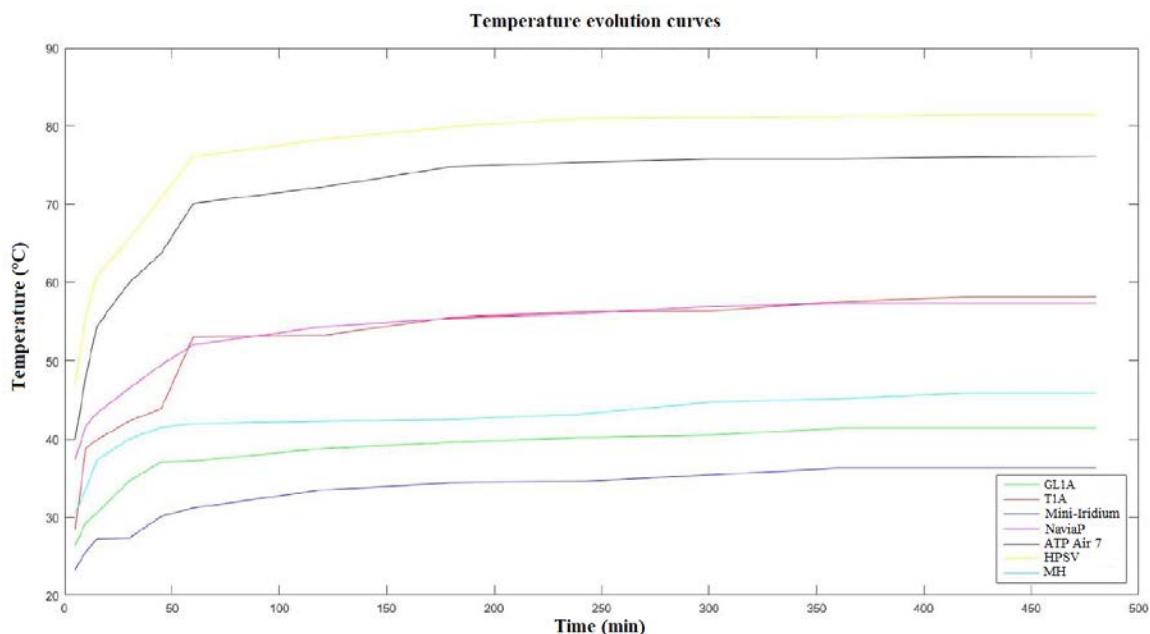


Figura 35 Comparación de la evolución de la temperatura máxima de las luminarias

La temperatura se mantiene estable después de aproximadamente cinco horas de funcionamiento, como se muestra en la figura. Se puede observar que las luminarias ATP y Vapor de Sodio de Alta Presión alcanzan una temperatura más elevada debido a su potencia nominal de funcionamiento de 200W y 250W respectivamente, que es significativamente superior a la del resto de luminarias, como era de esperar.

La siguiente tabla muestra las temperaturas máximas obtenidas en la última medición de cada luminaria en el disipador o carcasa dependiendo de la luminaria y el difusor. Se aprecia que, dependiendo del diseño, tecnología, potencia, distribución de LED y materiales, las temperaturas varían de una luminaria a otra.

Luminaria	Temperatura máxima disipador (°C)	Temperatura máxima difusor (°C)
ATP Air 7	72,7	40,2
NaviaP Solydi	55,4	39,3
LEDUS LGL1AS	39,3	67,8
LEDUS LRLT1A	51,5	52,1
Philips Mini Iridium	33,7	34
VSAP	79,8	69,5
HM	43,2	38,8

Tabla 40 Cuadro resumen de las temperaturas máximas de cada luminaria

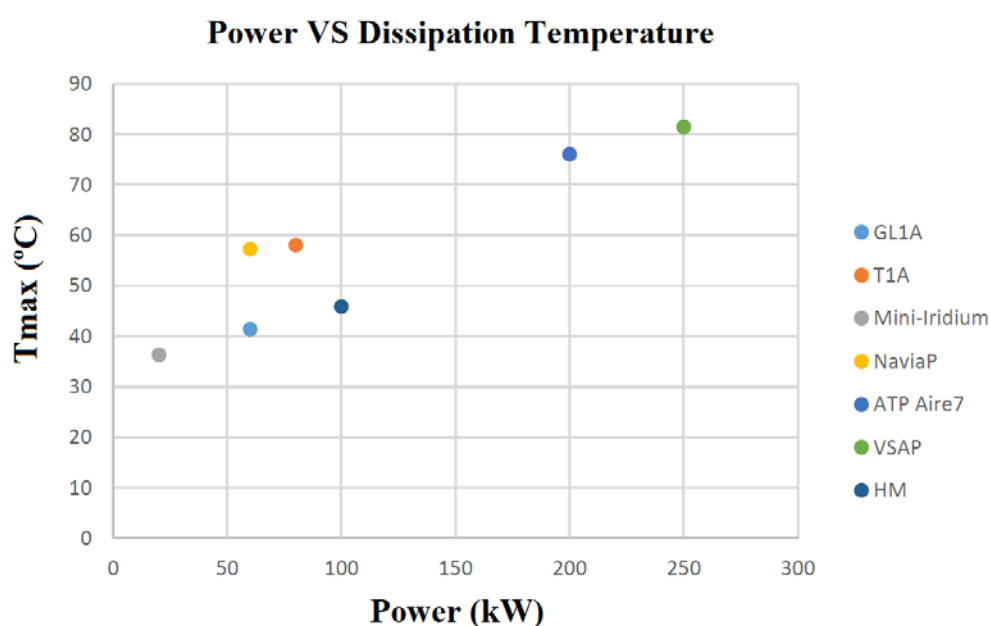


Figura 36 Gráfico de potencia en función de la temperatura de disipación

La figura anterior muestra la potencia nominal de cada luminaria frente a la temperatura máxima de disipación alcanzada para cada luminaria cuando la temperatura se ha estabilizado. Se puede observar que no existe una linealidad de la potencia nominal respecto a la temperatura máxima alcanzada debido a los diferentes diseños de las propias luminarias y a los materiales característicos que las componen.

Como se ha mencionado anteriormente, las altas temperaturas de disipación en las luminarias no son adecuadas y pueden reducir la vida útil del LED que compone la luminaria, así como la degradación de sus propiedades lumínicas. El problema de la disipación de calor es un gran hándicap para las lámparas con tecnología LED y no tanto para las lámparas de descarga, ya que éstas no se ven afectadas por la disipación de calor en cuanto a propiedades luminosas, pero sí pueden afectar al tiempo de vida útil ya que pueden afectar a los balastos de arranque.

Para estudiar cómo afecta la temperatura máxima alcanzada en la luminaria tras su estabilidad térmica a las propiedades lumínicas de los LED que la componen, se estudiaron las coordenadas de cromaticidad x-y del espacio de color CIE1931.

Posteriormente, utilizando las fichas técnicas de los fabricantes de LED de cada luminaria, se realizó un estudio de la evolución de las coordenadas luminosas C_x , C_y , en función de la temperatura de disipación, para finalmente obtener cuánto han disminuido dichas coordenadas, conociendo la temperatura máxima de disipación y obtener el impacto real de la temperatura sobre las propiedades lumínicas.

Para cuantificar cómo empeora la calidad cromática de la luz, en la siguiente tabla se muestra la comparativa de la evolución de las coordenadas de cromaticidad de todas las luminarias LED por efecto de la temperatura.

Luminaire	ΔC_x	ΔC_y
LEDUS LGL1AS	1,3%	1%
LEDUS LRLT1A	0,5%	1%
Philips Mini Iridium	0%	0%
NaviaP Solydi	0,5%	1%
ATP Air 7	0,1%	0,1%

Tabla 41 Comparación de las coordenadas de cromaticidad por efecto de la temperatura máxima

Como se puede observar en la tabla anterior, las luminarias GL1A, T1A y NaviaP sufren un deterioro de las propiedades lumínicas (coordenadas de cromaticidad) debido a la temperatura máxima de disipación, sin embargo, también se puede observar cómo las luminarias Philips y la ATP Air 7 son menos vulnerables a los efectos de las altas temperaturas de disipación de calor y prácticamente mantienen constantes sus coordenadas de cromaticidad.

La tabla también muestra que la luminaria GL1A presenta el mayor índice de deterioro de sus propiedades luminosas.

En cuanto a las luminarias de descarga, la temperatura máxima de disipación no afecta a las coordenadas de cromaticidad de la lámpara, debido a que aplica una tecnología de descarga y no hay temperaturas de unión como en el caso de la tecnología LED.

A modo de conclusión se puede extraer las siguientes ideas del estudio comparativo realizado:

A la hora de favorecer la disipación del calor, el disipador es el componente más importante para reducir la temperatura de unión. La mayoría de los disipadores están diseñados con aletas para aumentar su superficie de contacto con el aire y disipar más calor. Será necesario mejorar el diseño de los componentes de la luminaria para facilitar la disipación del calor y favorecer el paso del aire a través del disipador de las luminarias para bajar la temperatura de los dispositivos electrónicos. Para mejorar la refrigeración,

se pueden incorporar ventilaciones para mejorar el flujo del aire interior y que pueda salir al exterior.

Los dispositivos electrónicos se ven afectados por las altas temperaturas. Una alta temperatura de unión del LED varía la cromaticidad, reduciendo las propiedades luminosas, siendo la luminaria GL1A la más afectada por las altas temperaturas, en cuanto a variación de las coordenadas de cromaticidad, ya que es la que presenta una mayor variación.

Se ha demostrado que la potencia absorbida es proporcional al calor generado por la luminaria y, en función del diseño y la elección de los materiales, la temperatura de unión de los LED es más elevada debido a la escasa disipación del calor, lo que va en detrimento del buen funcionamiento de los LED.

Actualmente se están investigando materiales con nuevas aleaciones y formulaciones para una disipación térmica eficaz, por ejemplo, se ha desarrollado el nitrato de aluminio para ser aplicado como capa fina en los disipadores que presenta ciertas ventajas sobre los dieléctricos convencionales basados en polímeros o sustratos cerámicos como una excelente disipación térmica y una baja resistencia térmica. El tema de la disipación térmica está a la orden del día, se están investigando materiales para ser utilizados como disipadores de calor que promuevan una mayor durabilidad de los LED debido a una mejora en la disipación térmica.

Debido a lo cual, hay que tener en cuenta que las luminarias de alumbrado público de descarga y en las que se sustituyen por tecnología LED, al dejar la carcasa de las luminarias anteriormente instaladas, acaba afectando a los dispositivos electrónicos si no existe una buena disipación térmica. Como se ha comentado anteriormente en este apartado, el uso de rejillas de ventilación naturales o forzadas favorecería la disipación del calor de los componentes electrónicos.

Esta comunicación a Congreso Internacional está relacionada, como se ha podido comprobar, con el artículo 1 del presente compendio.

(Artículo 1: Impact of Thermal Dissipation on the Lighting Performance and Useful Life of LED Luminaires Applied to Urban Lighting: A Case Study).

4.8 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Debido a los resultados de la investigación realizada y presentada en forma de compendio de artículos, se exponen varias líneas de investigación abiertas a nuevos trabajos y que se detallan a continuación:

- De la primera investigación realizada, desarrollada y discutida en el artículo 1 del presente compendio, se observa que a una temperatura ambiente de trabajo de la luminaria modelo de 20°C, la temperatura de unión T_j de los diodos emisores de luz asciende hasta los 117°C, lo cual conlleva a una reducción del flujo luminoso del 20% aproximadamente, con lo cual la potencia que el ojo humano percibe como luz disminuye.

Además, esta alta temperatura de unión, también provoca un cambio en las coordenadas de cromaticidad, observando como empeora la calidad del color de la luz percibida por el ojo humano moviéndose en el diagrama de cromaticidad en torno al 15%.

A pesar de ser una luminaria relativamente moderna, de última generación y eficiente energéticamente, se observa que tanto la variación del flujo luminoso como las coordenadas cromáticas varían en un porcentaje muy alto, afectando a la vida útil. Sería interesante, y queda propuesta como futura línea de investigación, la construcción de una luminaria LED urbana que, para mejorar la refrigeración, incorpore en su construcción nuevos materiales que favorezcan una disipación térmica más eficiente como, por ejemplo, nitrato de aluminio, con el fin de observar en las simulaciones térmicas, en la fase de diseño, como impacta en la reducción de la temperatura de unión T_j , como parámetro clave en las propiedades lumínicas de esta tecnología electrónica.

- De la segunda investigación realizada, desarrollada y discutida en el artículo 2 del presente compendio, se observa como a pesar de que la tecnología LED es una forma de iluminación energéticamente eficiente, la estimación y correcta evaluación de un fenómeno eléctrico como es la corriente de arranque, es un parámetro clave para el correcto funcionamiento tanto de las lámparas como del circuito eléctrico. En el presente estudio se aplicaron métodos de toma de decisiones multicriterio objetivos. Se propone como futura línea de investigación, la aplicación de métodos subjetivos, como por ejemplo, PROMETHEE, AHP o ELECTRE, con el fin de observar las diferencias en la estimación de la corriente de arranque de las luminarias LED, debido a la propia naturaleza de la diferencias de métodos, pues se aplicaría una diferente importancia a cada uno de los criterios, mediante un conocimiento experto basado en la experiencia y construcción de cada luminaria analizada.

Además, se propone también como futura línea de investigación, realizar los ensayos de medición de la corriente de arranque en las luminarias, en un lugar que no contenga contaminación armónica que producen las fuentes de alimentación conmutadas de ordenadores, etc. con el fin de observar el impacto que produce la generación de armónicos en la corriente de irrupción de las luminarias LED.

4.9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gago-Calderón, A.; Hermoso-Orzáez, M.J.; De Andres-Diaz, J.R.; 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* 2018, 11, 816.
2. Li, R.; Liu, Q.; Huang, L.; Yin, L.; Song, G. Properties of Thermal Interface Materials and Its Impact on Thermal Dissipation and Reliability of LED Automotive Lighting. In *Proceedings of the 2018 15th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China, SSL China: IFWS 2018, Shenzhen, China, 15 October 2018*; IEEE: Shenzhen, China, 2018; pp. 154–157.
3. Tsai, C.C.; Cheng, W.C.; Chang, J.K.; Huang, S.Y.; Liou, J.S.; Chen, G.H.; Huang, Y.C.; Wang, J.S.; Cheng, W.H. Thermal-Stability Comparison of Glass- and Silicone-Based High-Power Phosphor-Converted White-Light-Emitting Diodes Under Thermal Aging. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 2012, 14, 4–8.
4. Pauley, S. Lighting for the Human Circadian Clock. Recent Research Indicates That Lighting Has Become a Public Health Issue. *Med. Hypotheses* 2004, 63, 588–596.
5. Dettweiler, U.; Becker, C.; Auestad, B.H.; Simon, P.; Kirsch, P. Stress in School. Some Empirical Hints on the Circadian Cortisol Rhythm of Children in Outdoor and Indoor Classes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 475.
6. Ritonja, J.; Mclsaac, M.A.; Sanders, E.; Kyba, C.; Grundy, A.; Cordina-Duverger, E.; Spinelli, J.J.; Aronson, K.J. Outdoor light at night at residences and breast cancer risk in Canada. *Eur. J. Epidemiol.* 2020, 35, 579–589.
7. Dominoni, D.M.; Borniger, J.C.; Nelson, R.J. Light at night, clocks and health: From humans to wild organisms. *Biol. Lett.* 2016, 12, 2–5.
8. Richard, G.; Stevens, P.; George, C.; Brainard, P.; David, E.; Blask, M.; Steven, W.; Lockley, P.; Mario, E.; Motta, M. Adverse Health Effects of Nighttime Lighting Comments on American Medical Association Policy Statement. *Am. J. Prev. Med.* 2013, 45, 343–346.
9. Cajochen, C.; Frey, S.; Anders, D.; Späti, J.; Bues, M.; Pross, A.; Mager, R.; Wirz-Justice, A.; Stefani, O. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J. Appl. Physiol.* 2011, 110, 1432–1438.
10. Chen, H.T.; Tan, S.C. Color Variation Reduction of GaN-Based White Light-Emitting Diodes Via Peak-Wavelength Stabilization. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013, 29, 3709–3719.

11. Zhang, Y.; Long, E.; Zhang, M. A New Thermal Interface Material: Graphene-epoxy Composite used for LED Heat Dissipation. *Chiang Mai J. Sci.* 2018, 45, 2459–2470.
12. Min, J.; Min, K. Journal of Affective Disorders Outdoor light at night and the prevalence of depressive symptoms and suicidal behaviors: A cross-sectional study in a nationally representative sample of Korean adults. *J. Affect. Disord.* 2018, 227, 199–205.
13. Cho, Y.; Ryu, S.-H.; Lee, B.R.; Kim, K.H.; Lee, E.; Choi, J. Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiol. Int. J. Biol. Med. Rhythm. Res.* 2015, 32, 1294–1310.
14. Hsu, C.N.; Tain, Y.L. Light and circadian signalling pathway in pregnancy: Programming of adult health and disease. *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 2232.
15. Liu, Y.; Mou, T. Evaluation of Window Lighting Considering the Circadian Effect. *In Proceedings of the CIE Centenary Conference towards a New Century of Light, Paris, France, 15–16 April 2013*; pp. 851–856.
16. Delendik, K.; Kolyago, N.; Voitik, O. Design and investigation of cooling system for high-power LED luminaire. *Comput. Math. Appl.* 2021, 83, 84–94.
17. Sun, L.; Zhu, J.; Wong, H. Simulation and evaluation of the peak temperature in LED light bulb heatsink. *Microelectron. Reliab.* 2016, 61, 140–144.
18. Shin, H.W.; Jung, S.B.; Lee, H.S. Thermal Resistance Analysis of Light-Emitting Diode Modules with Thermal Via Structure. *J. Electron. Mater.* 2018, 47, 7323–7330.
19. Cai, M.; Liang, Z.; Tian, K.M.; Yun, M.H.; Zhang, P.; Yang, D.G.; Zhang, G.Q. Junction Temperature Prediction for LED Luminaires Based on a Subsystem-Separated Thermal Modelling Method. *IEEE Access* 2019, 7, 119755–119764.
20. Sevik, S.; Abuska, M.; Özdilli, Ö. Thermal performance analysis of a novel linear LED housing with inner and outer fins. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2020, 119, 104970.
21. Chakravarthii, D.M.K.; Devarajan, M.; Choo, C.L.; Suvindraj, K. Thermal and Optical Performance of LEDs Mounted on Substrates With Converging-Diverging and Diverging-Converging Channels. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2018, 8, 1381–1390.
22. Chen, H.; Lin, S.; Xiong, C. Analysis and Modeling of Thermal Effect and Optical Characteristic of LED Systems with Parallel Plate-Fin Heatsink. *IEEE Photonics J.* 2017, 9, 1–11.
23. Hsieh, J.; Lin, D.; Cheng, C.; Kingkaew, S. The optimal design of the thermal spreading on high power LEDs. *Microelectron. J.* 2014, 45, 904–909.

24. Uddin S, Shareef H, Mohamed A. 2013. Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps. *Meas: J Int Meas Confed.* 46:3783–3795. doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.022.
25. Gil-de-castro A, Rönnerberg SK, Bollen MHJ. 2017. Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps. *Electr Power Syst Res.* 146:107–114. doi:10. 1016/j.epr.2017.01.026.
26. Gutiérrez-Ballesteros E, Gil-de-Castro A, Rönnerberg S, Garrido-Zafra J. 2021. Impact factors in LED lamp measurement reproducibility. *Light Res Technol.* 53:555–568. doi:10.1177/1477153520971250.
27. Unión-Sánchez JDD, Hermoso-Orzáez MJ, Hervás-Pulido MJ, Ogáyar-Fernández B. 2022. Impact of Thermal Dissipation on the Lighting Performance and Useful Life of LED Luminaires Applied to Urban Lighting: A Case Study. *Int J Environ Res Public Health.* 19:752. doi:10. 3390/ijerph19020752.
28. Jahkonen J, Puolakka M, Halonen L. 2013. Thermal management of outdoor LED lighting systems and streetlights- variation of ambient cooling conditions. *Leukos.* 9:155– 176. doi:10.1582/LEUKOS.2013.09.03.001.
29. Ramchandra DS, Bhaskar MS, Sanjeevikumar P, Mitolo M. 2020. Study of basic units and simulation of passive Light Emitting Diode (LED) driver configurations. In: *2020 20th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 4th IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS EUROPE)*. Madrid, Spain.
30. Wu CN, Chen YL, Chen Y. 2015. Primary-Side Peak Current Measurement Strategy for High-Precision Constant Output Current Control. *IEEE Trans Power Electron.* 30:967–975. doi:10.1109/TPEL.2014.2312955.
31. Liu W, Wang YX, Yang ZS, Ma H, Wen W. 2014. A novel two stage LED driver compatible with electronic transformers for MR16 lamp. In: *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Istanbul, Turkey. p. 380–385.
32. Hermoso-Orzáez MJ, Rojas-Sola JI, Gago-Calderón A. 2018. Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires. *Light Res Technol.* 50:282–293. doi:10.1177/1477153516645647.
33. Sadeghi MH, Damchi Y, Shirani H. 2018. Improvement of operation of power transformer protection system during sympathetic inrush current phenomena using fault current limiter. *IET Gener Transm Distrib.* 12:5968–5974. doi:10. 1049/iet-gtd.2018.5697.
34. Drgona P, Durana P, Betko T. 2021. Research of the negative influence of dimmed led luminaires in context of smart installations. *Sustainability (Switzerland)*. 13. doi:10.3390/su13179753.

35. Gil-De-Castro A, Moreno-Munoz A, Larsson A, de la Rosa JJG, Bollen M. 2013. LED street lighting: a power quality transducer. *J Phys Conf Ser.* 1187. doi:10.1088/1742-6596/1187/2/022004.
36. Nan T, He P, Yin L, Zhang J. 2016. An analysis on damage of light-emitting diodes reliability induced by electronic static discharge. In: *2016 17th International Conference On Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. Wuhan, China. p. 1122–1126.
37. Jenner R, Alencar N, Holanda U. 2014. A method to identify inrush currents in power transformers protection based on the differential current gradient. *Electr Power Syst Res.* 111:78–84. doi: 10.1016/j.epsr.2014.02.009.
38. Lei C, Zhizhong G, Yue C, Guizhong W. 2019. Measurement of inrush current in transformer based on optical current transducer. *J Phys Conf Ser.* 1187. doi:10.1088/1742-6596/1187/2/022004.
39. Bonislowski M, Holub M, Waszczuk P, Lewanski W. 2018. Automated test stand for transformer inrush current measurement. In: *14th Scientific Conference on Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*.
40. Cho Y, Kim J. 2011. Lifetime decrease of halogen lamps for automotive by duty cycle stress. *IEEE Trans Reliab.* 60 (3):550–556. doi:10.1109/TR.2011.2135730.
41. Koval L, Martinek R, Bilik P, Vanus J. 2017. Measurement of inrush current halogen lamps. In: *9th international scientific symposium on electrical power engineering (ELEKTROENERGETIKA)*. Stara Lesna, Slovakia. pp. 339–343.
42. Vahidi B, Khorsandi A. 2012. Simulation of effect of voltage sag on inrush current using MATLAB-SIMULINK for educational purpose. *Comput Appl Eng Educ.* 20:629– 633. doi:10.1002/cae.20431.
43. Xi YH, Tang X, Li ZW, Zeng X. 2018. Application of digital signal processing tools for the detection of voltage sag/ swell. *Int J Electr Eng Educ.* 55:186–209. doi:10.1177/ 0020720918754830.
44. Madani SM, Rostami M, Gharehpetian GB, Haghmaram R. 2012. Inrush current limiter based on three-phase diode bridge for Y-yg transformers. *IET Electr Power Appl.* 6:345–352. doi:10.1049/iet-epa.2011.0317.
45. Iuga B, Tirnovan R. 2019. Step by step limiting for capacitors inrush current used in voltage power supplies. In: *8th international conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Cluj, Romania. doi:10.1109/MPS. 2019.8759664
46. Saathoff EK, Pitcher ZJ, Shaw SR, Leeb S. 2020. Inrush current testing. In: *Thirty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2020)*, New Orleans, LA, USA. p. 2319–2326. doi:10.1109/APEC39645.2020.9124426

47. Lai CA, Lai Y. 2013. New AC/DC converter considering both inrush current limitation and start-up time. In: *IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. Kitakyushu, Japan, p. 1231–1235. doi:10.1109/PEDS.2013.6527207
48. Kalenteridis V, Agorastou Z, Siskos S. 2019. A soft start-up technique for inrush current limitation in DC-DC converters. In: *5th Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET2019)*. Volos, Greece. p. 57–60.
49. Ballo A, Grasso AD, Palumbo G. 2019. A review of charge pump topologies for the power management of IoT nodes. *Electronics*. 8:480. doi:10.3390/electronics8050480.
50. Mo C, Ji TY, Zhang LL, Wu QH. 2022. Equivalent statistics based inrush identification method for differential protection of power transformer. *Electr Power Syst Res*. 203:107664. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107664.
51. Majithia CA, Desai AV, Panchal A. 2011. Harmonic analysis of some light sources used for domestic lighting. *Light Res Technol*. 43:371–380. doi:10.1177/1477153510394597.
52. Zhang LL, Wu QH, Ji TY, Zhang AQ. 2017. Identification of inrush currents in power transformers based on higher- order statistics. *Electr Power Syst Res*. 146:161–169. doi:10. 1016/j.epsr.2017.01.029.
53. Tajdinian M, Allahbakhshi M, Bagheri A, Samet H, Dehghanian P, Malik O. 2020. An enhanced sub-cycle statistical algorithm for inrush and fault currents classification in differential protection schemes. *Int J Electr Power Energy Syst*. 119:105939. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105939.
54. Nguyen AV, Su S, Nguyen H. 2011. Development of a bayesian recursive algorithm to find free-spaces for an intelligent wheelchair. In: *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering-in-Medicine-and-Biology-Society (EMBS)*. Singapore. p. 7250–7253. doi:10.1109/IEMBS. 2011.6091832
55. Nguyen AV, Nguyen L. 2020. Identifying inrush currents based on Bayesian recursive algorithm for a numerical overcurrent protection relay. In: *4th IEEE International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*. Singapore. p. 75–79. doi:10.1109/ICGEA49367.2020. 239696
56. Sokmen, K.; 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. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 94, 534–542.
57. Hermoso-Orzáez, M.J.; Lozano-Miralles, J.A.; Lopez-Garcia, R.; Brito, P. Environmental Criteria for Assessing the Competitiveness of Public Tenders with the Replacement of Large-Scale LEDs in the Outdoor Lighting of Cities as a Key Element for Sustainable Development: Case Study Applied with PROMETHEE Methodology. *Sustainability* 2019, 11, 5982.

58. Jeon, G.W.; Seung-Taek, O.; Lim, J.H. Natural Light Property-Based LED Lighting System to Maintain Human Circadian Rhythm. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 630, 012019.
59. Rea, M.S. Human Health and Well-Being: Promises for a Bright Future from Solid-State Lighting. In *Proceedings of the SPIE 7954, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XV*; SPIE: San Francisco, CA, USA, 2011; p. 795404.
60. Shahzad, K.; Cucek, L.; Sagir, M.; Ali, N.; Rashid, M.I.; Nazir, R.; Nizami, A.S.; Al-Turaif, H.A.; Ismail, I.M.I. An ecological feasibility study for developing sustainable street lighting system. *J. Clean. Prod.* 2018, 175, 683–695.
61. Lozano-Miralles, J.A.; Hermoso-Orzáez, M.J.; Gago-Calderón, A.; Brito, P. LCA case study to LED outdoor luminaries as a circular economy solution to local scale. *Sustainability* 2020, 12, 190.
62. Anithambigai, P.; Chakravarthii, M.K.D.; Mutharasu, D.; Huong, L.H.; Zahner, T.; Lacey, D.; Kamarulazizi, I. Potential thermally conductive alumina filled epoxy composite for thermal management of high-power LEDs. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2017, 28, 856–867.
63. Lu, L.; Zhang, Z.; Guan, Y.; Zheng, H. Enhancement of Heat Dissipation by Laser Micro Structuring for LED Module. *Polymers* 2018, 10, 886.
64. Analysis, A. Power Quality and Energy Efficiency in the Pre-Evaluation of an Outdoor Lighting Renewal with Study and Amortization Analysis. *Energies* 2017, 10, 836.
65. Yu, X.; Zhang, B.; Zhao, S.; Kao, Z.; Yang, S. Enhancement of Heat Dissipation in LED Using Graphene and Carbon Nanotubes. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2018, 7, M153–M160.
66. Lee, D.; Lee, J.; Cho, M.; Park, H.; Cha, Y. Influence of the Thermal Conductivity of Thermally Conductive Plastics on the Thermal Distribution of an Light-Emitting Diode Headlight for Vehicles. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2018, 18, 5904–5907.
67. Macuzic, S.; Lukic, J.; Ruzic, D. Three-Dimensional Simulation of the McPherson Suspension System. *Teh. Vjesn. Gaz.* 2018, 25, 1286–1290.
68. Nair, D.V.; Ghoshdastidar, P.S. 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. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018, 121, 1316–1334.
69. Zhou, J.; Huang, J.; Wang, Y.; Zhou, Z. Thermal distribution of multiple LED module. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 93, 122–130.

70. Vera Coello, M.; Iglesias Estradé, I.; Sánchez Pérez, A.L.; Martínez Bazán, C. *Ingeniería Fluidomecánica*; Editorial Paraninfo: Madrid, Spain, 2012; ISBN 9788497329040.
71. Adalı EA, Işık AT. 2017. Critic and maut methods for the contract manufacturer selection problem. *Europ J Multidiscip Stud.* 5: 93. doi:10.26417/ejms. v5i1.p93-101.
72. Babatunde OM, Munda JL, Hamam Y. 2019. Selection of a hybrid renewable energy systems for a low-income household. *Sustainability (Switzerland).* 11:1–24. doi:10.3390/su11164282.
73. Jee DH, Kang KJ. 2000. A method for optimal material selection aided with decision making theory. *Mater Des.* 21:199–206. doi:10.1016/s0261-3069(99)00066-7.
74. Hussain SAI, Mandal U. 2016. National level conference on engineering problems and application of mathematics. *In: Proceedings of the national level conference on engineering problems and application of mathematics*, La Rochelle, France, 4–8 July. p. 1–6.
75. Zhu Y, Tian D, Yan F. 2020. Effectiveness of Entropy Weight Method in Decision-Making. *Math Probl Eng.* 2020:1–5. doi:10.1155/2020/3564835.
76. Shannon C. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst tech J.* 27:379–423. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
77. Shyu GS, Cheng BY, Chiang CT, Yao PH, Chang TK. 2011. Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan. *Int J Environ Res Public Health.* 8:1084–1109. doi:10.3390/ijerph8041084.
78. Gorgij AD, Kisi O, Moghaddam AA, Taghipour A. 2017. Groundwater quality ranking for drinking purposes, using the entropy method and the spatial autocorrelation index. *Environ Earth Sci.* 76:1–9. doi:10.1007/s12665-017-6589-6.
79. Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. 1995. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method. *Comput Oper Res.* 22:763–770. doi:10.1016/0305-0548(94)00059-H.
80. Yilmaz B, Harmancioglu NB. 2010. Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA.* 36:563–576. doi:10.4314/wsa. v36i5.61990.
81. Madic M, Radovanovic M. 2015. Ranking of some most commonly used non-traditional machining processes using rov and critic methods. *UPB Sci Bull D: Mech Eng.* 77:193–204.

82. Chen, H.Y.; Chen, C. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer. *Constr. Build. Mater.* 2016, 126, 130–137.
83. Wen, C.-D.; Chai, T.Y. Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and application of multispectral radiation thermometry. *Appl. Therm. Eng.* 2011, 31, 2414–2421.
84. Colaco, A.; Kurian, C.; Kini, S.; Colaco, S.; Johny, C. Thermal characterization of multicolor LED luminaire. *Microelectron. Reliab.* 2017, 78, 379–388.
85. Karatekin, C.; Kökkaya, O. Comparative analysis of different cooling fin types for countering LED luminaires' heat problems. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2018, 26, 454–466.
86. Ben Abdelmlek, K.; Araoud, Z.; Ghnay, R.; Abderrazak, K.; Charrada, K.; Zissis, G. Effect of thermal conduction path deficiency on thermal properties of LEDs package. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 102, 251–260.
87. Hahn, B.D.; Kim, Y.; Ahn, C.W.; Choi, J.J.; Ryu, J.; Kim, J.W.; Yoon, W.H.; Park, D.S.; Yoon, S.Y.; Ma, B. Fabrication and characterization of aluminum nitride thick film coated on aluminum substrate for heat dissipation. *Ceram. Int.* 2016, 42, 18141–18147.
88. Cho, E.C.; Huang, J.H.; Li, C.P.; Chang-Jian, C.W.; Lee, K.C.; Hsiao, Y.S.; Huang, J.H. Graphene-based thermoplastic composites and their application for LED thermal management. *Carbon N. Y.* 2016, 102, 66–73.
89. Moon, S.M.; Kwon, S.Y.; Lim, J.H. Implementation of smartphone-based color temperature and wavelength control LED lighting system. *Clust. Comput.* 2016, 19, 949–966.

4.10 TRAYECTORIA PROFESIONAL E INVESTIGADORA

La trayectoria investigadora del doctorando comienza con la realización y defensa del Trabajo Fin de Máster, relativo a la titulación de Máster Universitario en Ingeniería Industrial por la Universidad de Jaén, titulado **“Análisis comparativo de las consecuencias eléctricas y la disipación térmica de la sustitución de luminarias con lámparas de descarga por luminarias LED y sus efectos sobre la calidad lumínica y vida útil”**, en el año 2019.

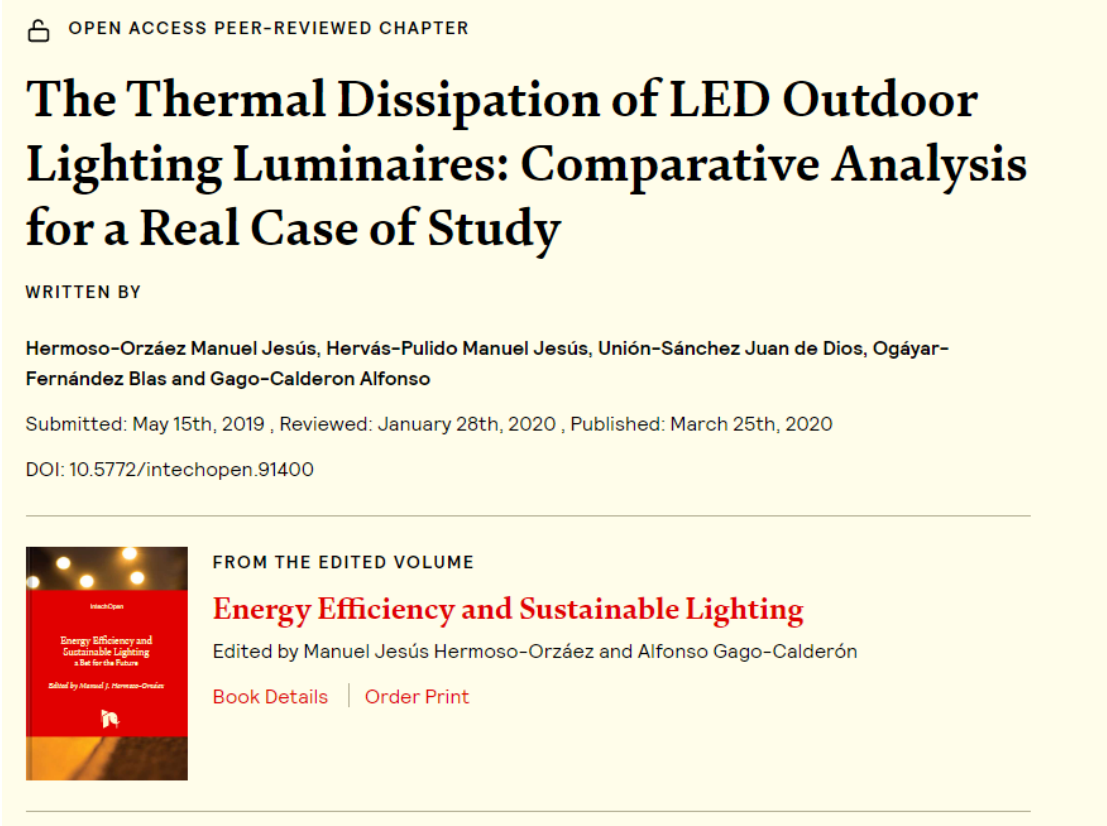
Este Trabajo Fin de Máster de tipo científico y orientado a la investigación dio lugar a la publicación de un capítulo de libro titulado **“The Thermal Dissipation of LED Outdoor Lighting Luminaires: Comparative Analysis for a Real Case of Study”** en la editorial IntechOpen, previo al inicio de los estudios de doctorado.

Escrito por:

Hermoso-Orzáez Manuel Jesús, Hervás-Pulido Manuel Jesús, **Unión-Sánchez Juan de Dios**, Ogáyar-Fernández Blas y Gago-Calderón Alfonso

Presentado: 04 de junio de 2019; Revisado: 28 de enero de 2020; Publicado: 25 de marzo de 2020

DOI: 10.5772/intechopen.91400



OPEN ACCESS PEER-REVIEWED CHAPTER

The Thermal Dissipation of LED Outdoor Lighting Luminaires: Comparative Analysis for a Real Case of Study

WRITTEN BY

Hermoso-Orzáez Manuel Jesús, Hervás-Pulido Manuel Jesús, Unión-Sánchez Juan de Dios, Ogáyar-Fernández Blas and Gago-Calderon Alfonso

Submitted: May 15th, 2019 , Reviewed: January 28th, 2020 , Published: March 25th, 2020

DOI: 10.5772/intechopen.91400

FROM THE EDITED VOLUME

Energy Efficiency and Sustainable Lighting

Edited by Manuel Jesús Hermoso-Orzáez and Alfonso Gago-Calderón

[Book Details](#) | [Order Print](#)

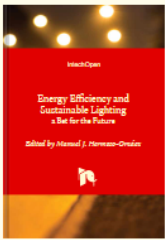


Figura 37 Capítulo de libro IntechOpen

Posteriormente a la defensa del Trabajo Fin de Máster, en el año 2019, el doctorado comienza trabajar en la empresa Valeo Lighting Systems, en el departamento de R&D, sobre temas de test y simulaciones referentes a la tecnología LED aplicada a la iluminación en automoción. Siendo en mayo del año 2021 cuando comienza los estudios de doctorado por la Universidad de Jaén.

El programa de Doctorado en el que se enmarca la presente Tesis Doctoral, es el de Energías Renovables dentro de la línea de investigación sobre eficiencia Energética y lumínica.

De esta forma, y tras adquirir experiencia en tecnología LED, comienza la Tesis Doctoral sobre eficiencia energética y lumínica de tecnología LED aplicada al alumbrado urbano.

Casi al mismo tiempo del comienzo de los estudios de doctorado, en el mes de octubre de 2021, recibe **una Beca de colaboración a tiempo parcial en el Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente (CEAEMA), de la Universidad de Jaén.**

Durante esta beca de colaboración se realizan trabajos en el laboratorio de iluminación y domótica de la EPSJ de la Universidad de Jaén relacionados con la línea de investigación de la presente Tesis Doctoral, dando fruto al primer artículo del presente compendio.

(Artículo 1: Impact of Thermal Dissipation on the Lighting Performance and Useful Life of LED Luminaires Applied to Urban Lighting: A Case Study).

Al mismo tiempo del inicio de la beca de colaboración, se une como miembro del equipo investigador al **Grupo de Investigación GIDIES de la UJA (I+D en Ingeniería, Energía y Sostenibilidad) (TEP-985).**

Cuyo investigador responsable es Dr. Julio Terrados Cepeda y las líneas de investigación son las siguientes:

- Aprovechamiento térmico y eléctrico de la biomasa
- Dirección y gestión de proyectos energéticos
- Evaluación de recursos energéticos renovables
- Planificación y prospectiva energética
- Redes y ciudades inteligentes (smart grid y Smart cities)
- Sistemas de energía solar fotovoltaica

<https://www.ujaen.es/grupos-de-investigacion/tep985/miembros>



CONSEJERÍA DE TRANSFORMACIÓN ECONÓMICA, INDUSTRIA, CONOCIMIENTO Y UNIVERSIDADES
Secretaría General de Universidades, Investigación y Tecnología
Dirección General de Investigación y Transferencia del Conocimiento

SICA SISTEMA DE INFORMACIÓN
CIENTÍFICA DE ANDALUCÍA

INFORME DE PERTENENCIA A GRUPOS DE INVESTIGACIÓN

De la información obrante en el Sistema de Información Científica de Andalucía (SICA) al día **04/06/2022**, resulta que D/D^a **Juan de Dios Unión Sánchez**, con DNI **26258892E**, ha sido integrante de Grupos de Investigación en los siguientes períodos:

Código del Grupo	Denominación del Grupo	Agente del Conocimiento	Período de pertenencia	Tipo (Componente, Investigador Responsable)
TEP-985	I+D en INGENIERÍA, ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD	Universidad de Jaén	11/03/2022 - Vigente	Componente

Figura 38 Pertenencia al grupo de investigación GIDIES de la UJA

Posteriormente, motivado por la docencia, en febrero de 2022, comienza como profesor de Secundaria de la asignatura de Matemáticas en la Junta de Andalucía. Mediante los conocimientos matemáticos adquiridos como profesor de secundaria, se centra en el estudio de métodos estadísticos de toma de decisiones multicriterio, lo que permite la publicación del segundo artículo del compendio que conforma la presente Tesis Doctoral.

(Artículo 2: Evaluation of Inrush Current in LED Luminaires Applied to Urban Lighting Based on Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Case Study)

Finalmente, desde diciembre de 2022, participa como miembro del equipo de trabajo, en varios Proyectos de Investigación concedidos tanto a nivel nacional por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, como a nivel autonómico por la Junta de Andalucía, al Grupo de Investigación GIDIES, denominados:

- **Sostenibilidad y resiliencia de las ciudades medianas y su contribución a la transición energética: metabolismo urbano circular, escenarios energéticos y propuestas de indicadores. Acrónimo: METURBAN2030. Tipo de proyecto: Competitivo R +D+I. Fecha de inicio: 01/12/2022. Fecha fin: 30/11/2024. Entidad financiadora: MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN. GOBIERNO DE ESPAÑA. Dirección centro: Servicio de Gestión de la Investigación. Código: 2022/00407/001. Referencia interna: MICIN_Transición_ECO_DIG_2021.**
- **SISTEMA ENERGÉTICO ANDALUZ Y PROSPECTIVA ENERGÉTICA 2050. ANÁLISIS DE POLÍTICAS ENERGÉTICAS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ANDALUCÍA. Convocatoria de Proyectos de investigación 2022. Centro de Estudios Andaluces. Código Proyecto: PRY079/22.**

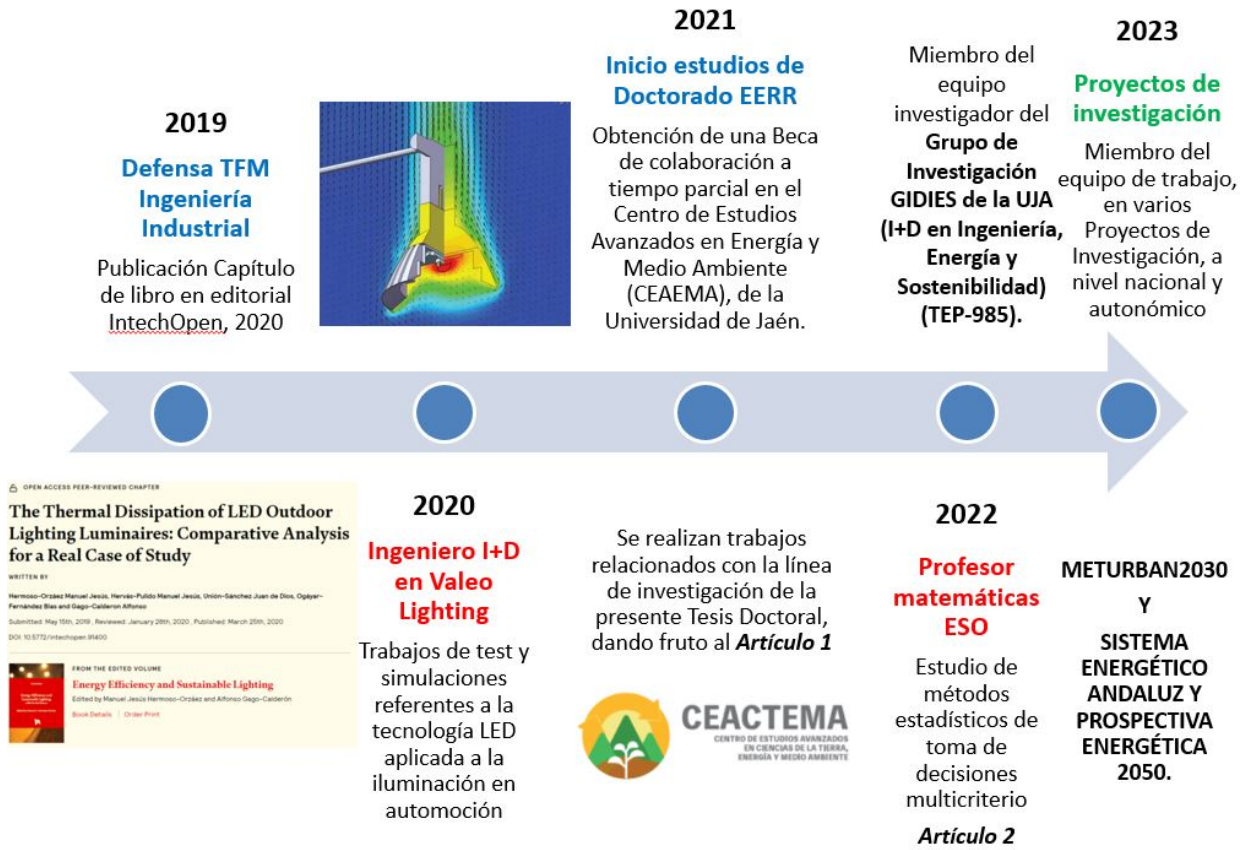


Figura 39 Trayectoria académica e investigadora. Fuente: elaboración propia

4.11 COMPENDIO DE PUBLICACIONES Y CERTIFICADOS

4.11.1 ARTÍCULOS JCR

4.11.2 CAPÍTULOS DE LIBRO Y COMUNICACIONES A CONGRESOS