



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Universitat Politècnica de València - Departamento de Matemática Aplicada

Universitat de València - Facultad de Matemáticas

Doctorado en Matemática Aplicada

**Modelados matemáticos para eficiencia energética: aplicaciones a la
iluminación LED y el monitoreo de edificios.**

M. en I. Mónica Cynthia Hernández Luna

Directores:

Pedro Fernández de Córdoba Castellá (UPV)

Humberto Michinel Álvarez (U. Vigo)

Romeo de Jesús Selvas Aguilar (UANL)

Octubre 2019

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio detallado de los procesos de transferencia de calor en luminarias LED de alta potencia (HP-LED) con disipadores de calor pasivos y el análisis de variables energéticas: consumo eléctrico y concentración de CO_2 , para obtener correlaciones que predigan el rendimiento energético de edificios. Como primer objetivo, se diseñan disipadores de calor adecuados a luminarias de distintas potencias. Para ello, se parte de un modelo matemático completo que describe la transferencia de calor en este tipo de sistemas, se realiza la simulación numérica usando métodos de elementos finitos y, además, se comprueban los resultados obtenidos en el laboratorio. Hemos centrado nuestro análisis en el caso de una fuente LED en contacto térmico con un disipador de calor pasivo de aluminio, obteniendo un excelente ajuste entre las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas realizadas. Con estos disipadores se garantiza tanto el comportamiento óptimo como la durabilidad de las luminarias.

Posteriormente como segundo objetivo, se estudia la relación de dos variables clave del rendimiento energético de un edificio: el consumo de energía y la concentración de CO_2 , cuyas correlaciones no han sido consideradas en la literatura. Para alcanzar este objetivo, se seleccionaron dos instalaciones ubicadas en diferentes continentes y se adquirieron los datos necesarios para su análisis con un sistema simple y económico para medir, transmitir y gestionar la información. La determinación matemática de la relación entre dos variables facilitará en gran medida la programación de algoritmos eficientes de control energético de instalaciones en plataformas de gestión energéticas.

El manejo de toda la información obtenida mediante sensores y gestionada a través de plataformas inteligentes requiere el desarrollo de líneas de investigación relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT) y que pertenecen a la era de la Industria 4.0. Los estudios incluidos en esta tesis doctoral pertenecen a dos áreas de trabajo que contribuyen a comprender y mejorar el rendimiento de las *Smart cities*: el uso de la información para convertir nuestros edificios en instalaciones sostenibles y el desarrollo de la iluminación inteligente (*Smart lighting*), consiste en incorporar sensores a las luminarias para convertir el sistema de iluminación pública de una ciudad en un laboratorio distribuido de variables de interés gestionado a través de plataformas inteligentes.

Abstract

This work presents a detailed study of the heat transfer processes in high power LED luminaires (HP-LED) with passive heatsinks and the analysis of energy variables: power consumption and concentration of CO_2 , to obtain correlations that predict the energy performance of buildings. As a first objective, heat sinks appropriate for luminaires of different powers are developed. For this, we start from a complete mathematical model that describes the heat transfer in this type of systems, the numerical simulation is performed using finite element methods and, in addition, the results obtained in the laboratory are compared. With these heatsinks, the optimum performance and durability of the luminaires is guaranteed.

Later, we propose to study the relation between two key variables of building performance: the power consumption and the CO_2 concentration, whose correlations have not been considered in the literature. To achieve this objective, two buildings located in different continents were selected and the necessary data were acquired for their analysis with a simple and economical system to measure, transmit and manage the information. Therefore, the mathematical determination of the relationship between the two variables will greatly facilitate the programming of algorithms in the energy management platforms.

The management of all information obtained through sensors and managed through intelligent platforms requires the development of research lines related to the Internet of Things (IoT) and that belong to the era of Industry 4.0. The studies included in this doctoral thesis belong to two areas of work that contribute to understanding and improving the performance of *Smart Cities*: the use of information to turn our buildings into sustainable installations and the development of *smart lighting*, consists of incorporating sensors to the luminaires to convert the public lighting system of a city into a distributed laboratory of variables of interest managed through intelligent platforms.

Resum

En aquest treball es presenta un estudi detallat dels processos de transferència de calor en lluminàries LED d'alta potència (HP-LED) amb dissipadors de calor passius i l'anàlisi de variables energètiques: consum elèctric i concentració de CO_2 , per a obtenir correlacions que prediguen el rendiment energètic d'edificis. Com a primer objectiu, es dissenyen dissipadors de calor adequats a lluminàries de diferent potències. Per a això, es parteix d'un model matemàtic complet que descriu la transferència de calor en aquest tipus de sistemes, es realitza la simulació numèrica usant mètodes d'elements finits i, a més, es comproven els resultats obtinguts en el laboratori. Hem centrat la nostra anàlisi en el cas d'una font LED en contacte tèrmic amb un dissipador de calor passiva d'alumini, obtenint un excel·lent ajust entre els mesuraments experimentals i les simulacions numèriques realitzades. Amb aquests dissipadors es garanteix tant el comportament òptim com la durabilitat de les lluminàries.

Posteriorment com a segon objectiu, s'estudia la relació de dues variables clau del rendiment energètic d'un edifici: el consum d'energia i la concentració de CO_2 , les correlacions de la qual no han sigut considerades en la literatura. Per a aconseguir aquest objectiu, es van seleccionar dues instal·lacions situades en diferents continents i es van adquirir les dades necessàries per a la seua anàlisi amb un sistema simple i econòmic per a mesurar, transmetre i gestionar la informació. La determinació matemàtica de la relació entre dues variables facilitarà en gran manera la programació d'algorismes eficients de control energètic d'instal·lacions en plataformes de gestió energètiques.

El maneig de tota la informació obtinguda mitjançant sensors i gestionada a través de plataformes intel·ligents requereix el desenvolupament de línies d'investigació relacionades amb l'Internet de les Coses (IoT) i que pertanyen a l'era de la Indústria 4.0. Els estudis inclosos en esta tesi doctoral pertanyen a dues àrees de treball que contribueixen a comprendre i millorar el rendiment de les *Smart cities*: l'ús de la informació per a convertir els nostres edificis en instal·lacions sostenibles i el desenvolupament de la il·luminació intel·ligent (*Smart lighting*), consistix a incorporar sensors a les lluminàries per a convertir el sistema d'il·luminació pública d'una ciutat en un laboratori distribuït de variables d'interés gestionat a través de plataformes intel·ligents.

Agradecimientos Institucionales

Primero que todo, quiero agradecer al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*, **CONACYT**, y de manera muy especial al *Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología del Estado de Nuevo León*, **i2t2**, quienes en conjunto me brindaron el apoyo económico para realizar mis estudios de Doctorado en el Extranjero con el número de **Beca** 296471 y **CVU**: 558076.



Instituto
de Innovación
y Transferencia
de Tecnología
Nuevo León
GOBIERNO DEL ESTADO



El éxito de este trabajo de tesis doctoral fue posible gracias a la colaboración y participación de las diferentes instituciones educativas, a las cuáles expreso mi más sincero agradecimiento por haber puesto a mi disposición todos los recursos y medios necesarios para la realización de mis estudios doctorales, reiterando el firme deseo de contar con su colaboración para trabajos a futuro.

A la *Universidad Politécnica de Valencia*, **UPV**.



A la *Universidade De Vigo*.



A la *Universidad Autónoma de Nuevo León*, **UANL**.



A la *Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas*, **FCFM**.



Agradecimientos Personales

Esta tesis doctoral, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte del autor y de sus directores de tesis, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte esencial para culminar mis estudios de doctorado.

A lo largo de este proyecto fue difícil asegurar el éxito, que no habría problemas,, inconvenientes o que simplemente todo estaría bien... eso fue complicado de asegurar. Lo que sí fue muy previsible en el transcurso de estos 4 años fue que se dieron situaciones que nunca imaginé, procesos y actitudes arriesgadas que fluyeron con normalidad.

Al darme cuenta de que las cosas no eran tan fáciles como creí en un inicio, hubo momentos y circunstancias que me desanimaron, me hacían replantear mi presente y futuro; pero el creer que siempre hay algo más, que estamos en el lugar exacto en el momento exacto solo es obra de alguien, cuando pones empeño y dedicación a tu trabajo y saber que tendrás una recompensa; eso es tener esperanza y **Dios** esta detrás de todo eso. Gracias a él por llenarme de salud, fuerzas y empeño; por que cada paso que doy esta lleno de aprendizaje y crecimiento, por que todo ello fue necesario para que en este día este culminando uno de los proyectos más importante en mi vida.

Sin duda alguna, uno de los pilares más fuertes e importantes en mi vida es él, sin duda el único con quien compartiría este camino y con quien he vivido muchas aventuras (y las que faltan), a quien decidí amar uniendo nuestras vidas y te estoy agradecida por todo tu apoyo incondicional, por toda tu ayuda no solo en el desarrollo de mi tesis, sino también en mi vida; eres mi inspiración y motivación, **Roberto Robledo Fava**.

Cuando tienes cimientos fuertes de amor, respeto, educación y humildad se abren grandes puertas, por lo cual les estaré siempre agradecida a mis padres. Gracias a ustedes por confiar, creer en mi y en mis capacidades, por sus palabras de aliento y apoyo incondicional sobre todo en los días difíciles de llevar, por siempre anhelar y desear lo mejor para mi vida. Gracias a Dios por la vida de mis padres, por que cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de las personas que sé que más me aman, y a las que amo con mi ser, ellos son: **J. Jesús Hernández Pizano y Ma. de los Ángeles Luna Ramírez**.

Sin mi hermano, la vida no sería la misma ya que es uno de los engranes perfectos que hace que nuestra familia se una perfectamente. Te agradezco por todo tu apoyo ya que fue clave en el inicio de este proyecto, por unirnos para lograr nuestros objetivos. Gracias por todos los momentos bonitos y por estar al pendiente de mí durante este proceso, **Ángel Hernández Luna**.

A mis suegros, **Roberto Robledo y Olga Fava**, por el cariño y apoyo incondicional que siempre me han manifestado, en general, a la familia **Robledo Fava** por todo su apoyo, que sin duda, ha sido muy valioso para mí.

La vida es hermosa, y si la podemos compartir y disfrutar con quienes amamos, podemos ayudar y guiar a muchas personas si ellas lo permiten, pero también podemos ser ayudados y guiados durante nuestra vida; por esto mismo, mediante estos agradecimientos de tesis quiero exaltar la labor de mis amigos que estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y desarrollo de este trabajo, gracias a aquellos que con respeto, paciencia y cariño realizaron aportes a la misma, gracias a todos.

El desarrollo de esta tesis no ha sido nada fácil y ellos lo saben, pero lo que sí les puedo afirmar que durante todo este tiempo que estuvo lleno de muchos momentos los cuales disfrute y atesoraré como bellos recuerdos en mi corazón, gracias por estar ahí, por su gran cariño que me han demostrado y saben que es mutuo, muchas gracias por todo especialmente mis amigos en **México (Arturo Castillo y Ana María)**, en **España (Diego, Daniel, Paula, Ramón y Chloe)**, no tengo con que pagarles todo lo que me han ayudado y nunca olvidaré todo lo que han hecho por mí.

Me gustaría agradecer de manera especial y sincera a mis directores de tesis, **Dr. Pedro Fernández de Córdoba Castellá, Dr. Humberto Michinel Álvarez, Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar y Dra. Sonia Zaragoza**, por aceptarme para realizar esta tesis doctoral bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo, así como su capacidad para guiar mis ideas han sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador. Las ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, han sido la clave del excelente trabajo que hemos realizado juntos, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación. Les agradezco también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

Índice general

Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Motivación	5
2. Estudio térmico en luminarias HP-LED.	7
2.1. Resumen	7
2.2. Introducción	7
2.3. Marco teórico	8
2.3.1. LED	8
2.3.2. HP-LED	13
2.3.3. Disipadores de calor	15
2.3.4. Características lumínicas de los LED's	17
2.3.5. Iluminación exterior	21
2.3.6. Transferencia de calor	28
2.3.7. Conducción	28
2.3.8. Convección	30
2.3.9. Radiación	32
2.3.10. Efecto Joule	33
2.4. Modelado numérico	33
2.5. Diseño numérico de la luminaria HP-LED	35
2.5.1. Diseño de prototipo en SOLIDWORKS®	36
2.5.2. Resultados de la simulación numérica.	39
2.6. Diseño experimental de la luminaria HP-LED	42
2.6.1. Resultados experimentales de la luminaria HP-LED	45

2.6.2.	Cálculo de error: numérico vs. experimental	46
2.6.3.	Análisis de sensibilidad: método Monte Carlo	48
2.7.	Discusiones y conclusiones	50
3.	Gestión energética en edificios no residenciales utilizando técnicas de la industria 4.0 basadas en correlación estadística.	51
3.1.	Resumen	51
3.2.	Introducción	52
3.3.	Marco teórico	54
3.3.1.	Actividad humana	54
3.3.2.	Dióxido de carbono, CO_2	55
3.3.3.	Propiedades de gases y vapores peligrosos	56
3.3.4.	Sistemas de detección de gases.	57
3.3.5.	Sensores de CO_2 en interiores.	59
3.3.6.	Sensores IR: principio de medición.	59
3.3.7.	Elevada concentración de CO_2	61
3.3.8.	Ventilación para una calidad de aire interior aceptable.	62
3.3.9.	Consumo eléctrico	63
3.4.	Material y métodos	64
3.4.1.	Descripción de las instalaciones	64
3.4.2.	Métodos de adquisición de datos	65
3.4.3.	Métodos estadísticos	66
3.5.	Resultados	66
3.6.	Conclusiones y discusiones	73
4.	Conclusiones generales	77
	Bibliografía	81
	ANEXOS	91
	Anexo I: Diseño de una luminaria LED en SolidWorks®	91
	Anexo I: Diseño de una luminaria LED en SolidWorks®	91
.0.1.	Conceptos básicos de SOLIDWORKS®	91
.0.2.	Aspectos generales	96
.0.3.	Estudio	97

Índice de figuras

1.1. Concepto de Smart city.	2
2.1. El desarrollo de los LED en términos de eficacia luminosa en los últimos 40 años [15,16].	8
2.2. Una comparación gráfica de los costos totales de operación para fuentes de luz LED, incandescentes y fluorescentes. Los costos operativos generales para la iluminación de 1000 lm con las tres fuentes diferentes se estimaron como un costo promedio de la fuente y el costo de la energía (0.15 \$/kWh) con respecto al tiempo de vida y las eficiencias correspondientes en la Tabla 2.1 [15-24].	9
2.3. Recombinación de electrones y huecos en la unión P-N de un LED en polarización directa [25,26].	10
2.4. Construcción y características del LED blanco: (a) LED de color RGB, casi blanco; (b) a través de un LED azul y blanco fluorescente; y (c) a través del LED ultravioleta cercano y RGB [27].	12
2.5. Conexión interna (paralelo) de un HP-LED [34].	14
2.6. Chip LED [44].	18
2.7. Vista nocturna de capitales europeas tomadas la misma noche desde la Estación Espacial Internacional [46,47].	22
2.8. Contaminación lumínica en el lago de L'Albufera de día (izq.) y noche(der.) [51].	25
2.9. Calle principal iluminada con tecnología LED [49].	27
2.10. Tasa de conducción de calor [53].	29
2.11. Conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ K$) [53].	30
2.12. Formas de circulación de un fluido [54].	31
2.13. Convección forzada [54].	31
2.14. Longitud de onda (μm) [54].	32
2.15. Energía térmica del sol [54].	32
2.16. Simulación numérica de la distribución de temperatura sobre la superficie de un disipador de calor pasivo en configuración vertical. Los rangos de color van desde $50^\circ C$ a $61^\circ C$ [55].	35

2.17. Luminaria para interiores: (izda.) vista frontal y vista lateral (dcha.).	36
2.18. Luminaria para exteriores: (a) vista inferior, (b) vista superior y (c) vista lateral.	37
2.19. Dimensiones del diseño de la base chip LED en SOLIDWORKS®.	37
2.20. Malla sólida de luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®: a) vista superior, b) vista lateral y c) vista inferior.	38
2.21. Dimensiones del diseño de la luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®.	38
2.22. Simulación térmica de la luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®: a) vista superior, b) vista inferior y c) vista lateral.	40
2.23. Comportamiento térmico: calentamiento y enfriamiento de la luminaria HP-LED obtenidos con SOLIDWORKS®.	40
2.24. Comportamiento térmico de la luminaria HP-LED en fase de calentamiento a 35 W en SOLIDWORKS®.	41
2.25. Esquema experimental para analizar el comportamiento térmico de la luminaria HP-LED.	42
2.26. Sistema real experimental de la luminaria HP-LED.	43
2.27. Configuración real de la monitorización : a) luminaria encendida, b) sensor de temperatura y c) conexión interior del sensor.	44
2.28. Calentamiento/enfriamiento experimental de la luminaria HP-LED.	45
2.29. Comparación de curvas de calentamiento numérico/experimental a 35 W.	47
2.30. Distribución normal: a) convección y b) radiación.	48
2.31. Coeficiente de convección, h	49
2.32. Coeficiente de radiación, ξ	49
3.1. Intercambio de energía del cuerpo humano.	54
3.2. Ciclo del dióxido de carbono, CO_2 , [87].	55
3.3. Esquema de un sensor.	57
3.4. Molécula de CO_2 excitada.	60
3.5. Esquema de un sensor IR [90].	61
3.6. El edificio en España. Izquierda: vista de la parte externa del edificio con una simulación 3D superpuesta. Derecha: detalle de la posición de los sensores de CO_2 dentro de la oficina (puntos verdes).	64
3.7. Dos fotografías de la instalación en la oficina de España. Izquierda: uno de los sensores colocado en la pared. Derecha: el panel de control.	65
3.8. Consumo de potencia (P) y Concentración de CO_2 en los días del 2 al 5 de enero 2015 en el edificio de España.	67
3.9. Evolución comparada en días hábiles típicos en Sada. Se muestra el consumo de energía (P) (línea azul) y la concentración de CO_2 (línea naranja). Las curvas para los datos medidos en Panamá son cualitativamente similares.	68

3.10. Diagramas de dispersión de las muestras de datos. Los puntos azules corresponden a las mediciones individuales. La línea continua roja es la que mejor se ajusta al modelo de regresión lineal y las líneas continuas azules marcan sus intervalos de predicción con un nivel de confianza del 95 %. La línea roja discontinua es una regresión no paramétrica que utiliza un estimador Nadaraya-Watson.	69
3.11. Diagnóstico del modelo de regresión lineal. Los paneles en la parte superior corresponden a la oficina española y los que están en la parte inferior a la oficina panameña. A la izquierda, trazamos los residuos como una función de la potencia. A la derecha, se muestra un histograma de los residuos y se compara con una distribución normal con la misma normalización y desviación estándar.	70
3.12. Los coeficientes de correlación de Pearson (azul) y Spearman (rojo), calculados para las muestras de datos de los doce meses del año para las oficinas en España (izquierda) y Panamá (derecha). Las líneas punteadas horizontales marcan sus valores cuando el cálculo se realiza introduciendo todos los datos anuales.	71
3.13. Coeficientes de los mejores ajustes lineales para cada mes. $CO_2(\text{ppm}) \approx (\text{Intercepción}) + (\text{Pendiente})P$. Las líneas horizontales marcan las de todo el año. Las barras de error representan los errores estándar de los parámetros que mejor se ajustan. Los paneles en la parte superior corresponden a la oficina española y los que están en la parte inferior a la oficina panameña.	71
3.14. Evolución comparada durante una semana, de miércoles a martes, en un área recreativa en la ciudad de Panamá. Se muestra el consumo de energía (línea azul) y la concentración de CO_2 (línea naranja).	72
1. Pantalla principal SOLIDWORKS®.	91
2. Pieza, ensamblaje o 2D.	92
3. Nuevo documento en SOLIDWORKS®.	98
4. Chip LED en 2D.	98
5. Operación Extruir.	98
6. Chip LED en 3D.	99
7. Cilíndro del disipador en 2D.	99
8. Cilíndro del disipador en 3D.	99
9. Aleta del disipador en 2D.	100
10. Paso previo a la unión de la aleta.	100
11. Mover entidades (menú).	100
12. Operación: Matriz circular.	101
13. Ensamble de la luminaria LED.	101
14. Ensamble del chip LED y el disipador.	101

15.	Luminaria con aleta rectangular.	102
16.	SOLIDWORKS Simulation.	102
17.	Estudio Tipo: Térmico.	103
18.	Material: Aluminio-Aleación 1060.	103
19.	Aluminio-Aleación 1060 en chip y disipador.	104
20.	Resistencia térmica.	104
21.	Potencia calorífica.	105
22.	Convección del chip y el disipador.	106
23.	Parámetros del Mallado.	106
24.	Malla basada en curvatura.	107
25.	Proceso de la simulación.	107
26.	Opciones de gráfico.	108

Índice de tablas

2.1. Una comparación de un solo LED blanco de última generación, una lámpara LED blanca (16 W), una fuente fluorescente (TS 35 W) y fuente de luz incandescente (100 W) [17,23,24].	9
2.2. Propiedades físicas del Aluminio 6061 [43].	17
2.3. Cargas térmicas y material de la luminaria HP-LED.	39
2.4. Valores máximos de temperatura para las potencias de 25 a 60 W. . .	42
2.5. Valores experimentales reales para las temperaturas de 25 a 60 W. .	46
2.6. Porcentajes de error en mediciones numéricas vs experimentales. . .	47
3.1. Valor de la tasa metabólica respecto a la actividad que se desarrolla.	54
3.2. Concentración de CO_2 (ppm) y sus efectos en las personas [96]. . .	62

Capítulo 1

Introducción

La iluminación LED (Diodo Emisor de Luz, por sus siglas en inglés Light Emitting Diode) y las redes de comunicación están revolucionando la iluminación pública. Como consecuencia, las redes de iluminación de las ciudades se están transformando en plataformas para una amplia variedad de innovaciones de *Smart cities* (ciudades inteligentes) Fig. 1.1 [1]. A partir de esto, se crea una visión de las redes de iluminación de ciudades como una plataforma de ciudades inteligentes para la iluminación pública. La disminución de los costos tanto en consumo eléctrico como en mantenimiento y las mejoras en la calidad hacen que la iluminación LED sea la opción predeterminada a medida que las ciudades reemplazan y se ponen a la vanguardia con los sistemas de iluminación existentes. Investigaciones han demostrado que los LED pueden reducir el consumo de energía para la iluminación pública hasta en un 50 %, y debido a que el precio y la calidad de los sistemas de iluminación LED continúan mejorando, permite que se amplíen los panoramas en el mercado.

Pero instalar iluminación LED es solo el primer paso. En la actualidad, muchas ciudades se están dando cuenta de que el actualizar las farolas también brinda una excelente oportunidad para instalar una red de monitoreo de diversas variables que se relacionan con una estrategia de *Smart lighting* (iluminación inteligente). Esta monitorización, a su vez, ofrece una oportunidad de crecimiento debido a que se pueden implementar una amplia gama de soluciones que pueden ahorrar dinero, tiempo, garantizar la seguridad de las personas, ayudar y mejorar las condiciones medio-ambientales, por lo cual resulta muy atractivo para la introducción de nuevas tecnologías para dar paso hacia una *Smart city* Fig. 1.1.

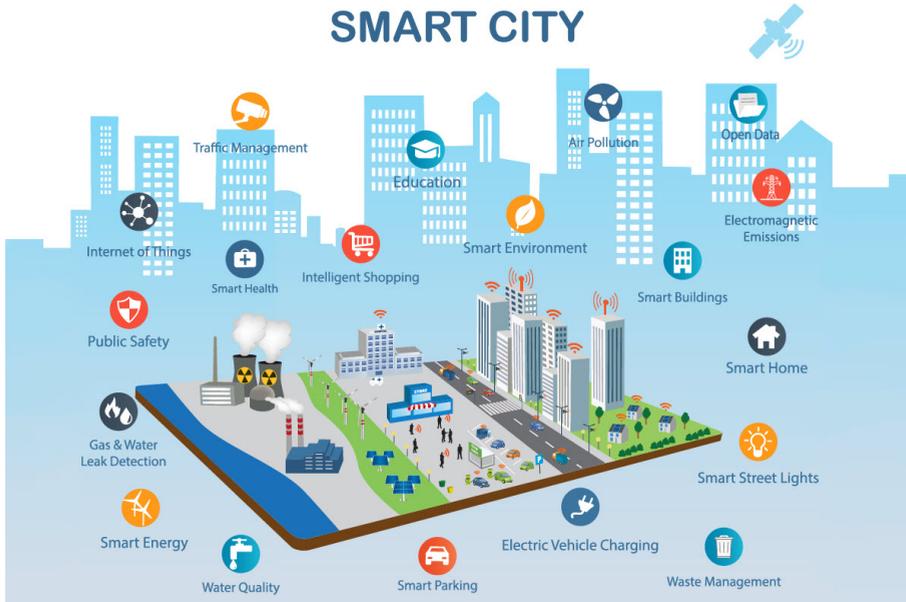


Figura 1.1: Concepto de Smart city.

Las soluciones de *Smart cities* están siendo estudiadas y aplicadas por investigadores y gobiernos de todo el mundo, las cuales están orientadas a disminuir el calentamiento global reduciendo las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, gestionando de una forma más adecuada los problemas en el aumento de las poblaciones urbanas y los impactos negativos que sufre la naturaleza [2–4].

Lo anterior fue una de las motivaciones principales para el desarrollo de este trabajo de tesis, que está constituido por un estudio mediante un modelado matemático y su análisis experimental de los disipadores de calor de aluminio para luminarias LED de alta potencia (HP-LED High Power Light Emitted Diode) enfocado hacia la iluminación exterior, donde uno de los aspectos claves es el control adecuado de la temperatura del chip LED, ya que de ello depende su rendimiento y vida útil.

Es importante adoptar estrategias y medidas específicas para que las *Smart cities* se desarrollen de forma sostenible también en términos ambientales y energéticos. La velocidad a la que se están sucediendo las innovaciones tecnológicas y el desarrollo de Big Data ha disparado las expectativas de crecimiento de dispositivos y sensores de recogida y transmisión de información en todos los ámbitos incluyendo las *Smart cities*. Es importante mencionar que, en la actualidad, los *edificios inteligentes* son el medio y el fin para construir las ciudades del futuro. El objetivo de los *edificios inteligentes* es satisfacer las demandas referentes a aspectos como confort, seguridad, conectividad, eficiencia energética, operaciones y mantenimiento, cumpliendo con las normativas y legislaciones vigentes.

Los *edificios inteligentes* abarcan todos los tipos de tipologías, incluyendo viviendas, oficinas, industrias, etc. Actualmente, una gran parte de las actividades humanas emiten elevadas cantidades de CO_2 y, por ello, es necesario un mayor consumo energético para que el sistema de aire acondicionado limpie el aire viciado y así, minimice malestares físicos y pueda garantizar el confort de los ocupantes. Por tal motivo, se incluyó en el trabajo de tesis un estudio de la relación entre las emisiones de CO_2 de los ocupantes y el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado, con el propósito de predecir de forma matemática su comportamiento, con ayuda de una plataforma de gestión energética y sensores colocados de forma estratégica para monitorizar en tiempo real, desde múltiples dispositivos, el comportamiento de estas variables en un edificio, todo esto enfocado hacia una *Smart city*. Esto fue posible gracias a la colaboración que se tiene con la empresa Fridama Instalaciones, S. L. por facilitarnos el acceso completo a sus oficinas ubicadas en España y Panamá.

1.1. Hipótesis

Las *Smart cities* basan su estrategia en el uso de tecnologías de la información y la comunicación en diferentes campos como la economía, el medio ambiente, la movilidad, la gobernabilidad, entre otros, con el propósito de transformar la infraestructura y los servicios de la ciudad. El potencial de nuevas tecnologías que incluyen sistemas de iluminación LED, sensores de gases de efecto invernadero y el almacenamiento de datos, forman parte de las soluciones a los problemas que enfrenta la población mundial como reducir los consumos energéticos así como a los graves problemas de contaminación ambiental. Por tal motivo, en este trabajo se plantea lo siguiente: ¿es posible garantizar la vida útil de las luminarias HP-LED utilizando disipadores de calor de aluminio? ¿se puede predecir el comportamiento térmico de una luminaria HP-LED por medio de un modelado matemático? Entre el coeficiente de radiación y constante de convección, ¿cuál de ellos tiene una mayor influencia en el comportamiento de la temperatura de una luminaria HP-LED? ¿existe una relación estadística entre el consumo energético de los edificios y los niveles de CO_2 en interiores? ¿se puede predecir su consumo energético en base a los ocupantes? ¿cuál es el impacto de utilizar luminarias (farolas) LED como puntos de monitorización de diversas variables físicas como temperatura, CO_2 , humedad, entre otros?.

1.2. Objetivos

La mayoría de las personas, en la actualidad, tienen un mayor acercamiento a cualquier tipo de información pero también a una forma de vida diferente y, con ello, las tecnologías han cambiado nuestro mundo. El concepto de *Smart city* es una concepción que ya comienza a implementarse y a convertirse en realidad.

Las soluciones tecnológicas en las comunidades a lo largo del mundo son muestra de cómo la tecnología no sólo hace más eficiente la operatividad y los negocios en espacios urbanos, sino que son un paso importante hacia ciudades más resilientes y avanzadas de la mano de herramientas digitales como el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) y sistemas analíticos de Big Data. En este contexto donde, a continuación, se plantean los objetivos de este trabajo de tesis.

1.2.1. Objetivo general

En este trabajo de tesis se tiene como objetivo unificar diferentes tecnologías actuales como la iluminación LED de alta potencia que incluye su diseño e implementación en condiciones reales con el propósito de obtener dispositivos más eficientes, con la posibilidad de unificar en un punto remoto (farola) diferentes tecnologías (sensores de contaminación o ruido, conexión de redes inalámbricas, seguridad, etc.). Además del estudio de la calidad de aire interior en un edificio que fue monitorizado en tiempo real utilizando sistemas de almacenamiento Big Data y, con ello, verificar la relación entre los consumos de energía y la cantidad de CO_2 que producen principalmente los ocupantes, garantizado su confort. Lo anterior, con el propósito de orientar al estudio e implementación de *Smart cities*.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseño numérico de una luminaria HP-LED mediante el software de simulación de modelado mecánico SOLIDWORKS®.
- Diseño e implementación experimental de la luminaria HP-LED, en base al prototipo creado anteriormente.
- Cálculo de error del modelado numérico vs. experimental.
- Análisis de sensibilidad mediante el método de Monte Carlo respecto a la variación de dos parámetros de diseño: constante de convección y coeficiente de radiación.

- Monitorización en tiempo real por medio de una plataforma de gestión energética mediante Big Data.
- Estudio de la relación entre el consumo de energía y la concentración de CO_2 .
- Análisis comparativo de diferentes conjuntos de datos para comprender el rendimiento de una instalación y actividad humana en su interior.

1.3. Motivación

La aceleración de la urbanización a nivel mundial y la revolución digital plantea a las ciudades y a los países una serie de retos para atender las necesidades de las poblaciones en crecimiento, comenzando con elementos básicos como infraestructura, saneamiento, transporte, energía, vivienda, seguridad, empleo, salud, educación, comunicación, entre otros. Desde su aparición en los años noventa del siglo pasado, el concepto *Smart city* ha estado fuertemente marcado por la tecnología como el elemento clave para abordar los grandes retos que prácticamente, la mayoría de los países afrontan en este siglo como la planificación, administración y gobernanza de las ciudades de forma sostenible; esto último incluye una mayor eficiencia energética, disminuir las emisiones contaminantes y reconducir el cambio climático.

Las *Smart cities* usan conectividad, sensores distribuidos en el ambiente y sistemas computarizados de gestión inteligente para solucionar problemas inmediatos, organizar escenarios urbanos complejos y crear respuestas innovadoras para atender las necesidades de los ciudadanos. Es por ello, que es una gran motivación desarrollar este tipo de desafíos enfocando mi trabajo de tesis hacia el uso de las farolas como múltiples puntos de acceso remoto hacia la conectividad y monitorización de sensores distribuidos, con el propósito de innovar tecnología enfocada a desarrollar los procesos urbanos de manera eficiente y sostenible, optimizando los recursos disponibles y generando mejor calidad de vida para los ciudadanos.

Capítulo 2

Estudio térmico en luminarias HP-LED.

2.1. Resumen

En este capítulo presentamos el estudio detallado de los procesos de calentamiento y enfriamiento en luminarias HP-LED con disipadores de calor pasivos. Se partirá de un modelo matemático, que describe la transferencia de calor en este tipo de sistemas y el resultado final es un esquema de trabajo que permite describir diferentes conjuntos de datos. Hemos centrado nuestro análisis en el caso común de una fuente LED en contacto térmico con un disipador de calor pasivo de aluminio, obteniendo un excelente ajuste entre las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas realizadas.

2.2. Introducción

El uso de Diodos Emisores de Luz de Alta Potencia (HP-LED, High Power-Light Emitting Diode) para iluminación pública es un tema emergente, en base a desarrollos recientes de diferentes tecnologías, incluidos materiales semiconductores [5–7], técnicas de fluorescencia [8], manejo de electrónica [9] o control térmico [10], entre otros [11, 12]. Uno de los aspectos clave relacionados con el rendimiento y la durabilidad de los sistemas de iluminación HP-LED es el control adecuado de la temperatura del chip LED [13]. Como se ha señalado en estudios recientes [14], los LED tienen una alta eficiencia energética y una vida útil prolongada, sin embargo, una gran cantidad de calor se disipa durante la operación debido al efecto Joule;

por lo tanto, el enfriamiento de los HP-LED es un desafío importante en los diseños de los modelos, donde una evacuación correcta de calor aumentará sustancialmente la vida útil del dispositivo. Además de la restricción anterior, otros aspectos prácticos como una configuración compacta, bajo costo, producción en masa o incluso consideraciones estéticas pueden desempeñar un papel importante en los productos orientados al mercado. Por tanto, en este capítulo presentamos un análisis numérico de la estabilización térmica de chips LED variando su potencia en un rango de 25 a 60 W, conectados a disipadores de calor pasivos, que es una configuración habitual para luminarias exteriores utilizadas en el mercado de alumbrado público. En este trabajo, hemos comprobado que el disipador de calor que se analiza, mantiene la temperatura del chip LED muy por debajo de los 70° C en condiciones reales, lo que permite el funcionamiento a largo plazo del dispositivo, con los ahorros correspondientes en el consumo de energía y mantenimiento. Este prototipo de enfriamiento de configuración compacta y lista para instalarse se ha diseñado a partir de los cálculos numéricos realizados, demostrándose más adelante que se obtiene un buen ajuste entre las simulaciones numéricas y los datos experimentales reales obtenidos.

2.3. Marco teórico

2.3.1. LED

El primer Diodo Emisor de Luz (LED, Light Emitting Diode) práctico inducido en 1962 [15, 16] tenía una eficiencia luminosa de solo 0.15 lm/W, Fig. 2.1.

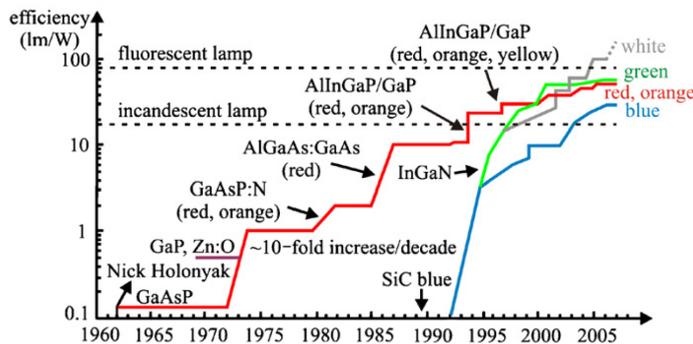


Figura 2.1: El desarrollo de los LED en términos de eficacia luminosa en los últimos 40 años [15,16].

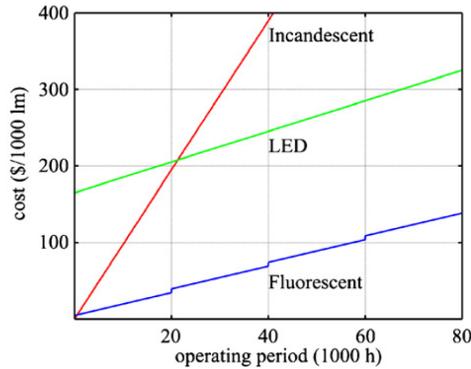


Figura 2.2: Una comparación gráfica de los costos totales de operación para fuentes de luz LED, incandescentes y fluorescentes. Los costos operativos generales para la iluminación de 1000 lm con las tres fuentes diferentes se estimaron como un costo promedio de la fuente y el costo de la energía (0.15 \$/kWh) con respecto al tiempo de vida y las eficiencias correspondientes en la Tabla 2.1 [15-24].

Desde entonces, el rápido desarrollo sostenido de los LED dio como resultado una mejora significativamente en términos de la eficacia lumínica, los espectros de emisión disponibles, la intensidad, la duración, el costo y la fiabilidad [17–22], Fig. 2.2.

Propiedades	LED simple	Lámpara LED	T5 Fluorescente	Incandescente
Eficacia luminosa (lm/W)	90 (69)	75	104	16
Flujo luminoso (lm)	100 (700)	1200	3650	1600
Temperatura de color correlacionada (°K)	6300	4000	3000-4100	2800
Índice de reproducción de color (CRI)	70	70	85	100
Tiempo de encendido (s)	10^{-8}	10^{-8}	1	0.1
Vida útil (h)	50 000	80 000	20 000	1500
Costo de la fuente (\$/1000 lm)	70 (40)	165	3	0.5
Costo de energía (\$/1000 lm/1000 h) ^a	1.7 (2.2)	2	1.5	9.4
^a 0.15 \$/kWh.				

Tabla 2.1: Una comparación de un solo LED blanco de última generación, una lámpara LED blanca (16 W), una fuente fluorescente (TS 35 W) y fuente de luz incandescente (100 W) [17,23,24].

La estructura fundamental de los diodos electrónicos consiste en la unión de dos porciones de cristal, generalmente de silicio (*Si*), en los que se han añadido impurezas de una manera controlada, Fig. 2.3. Estas impurezas son normalmente algún metal u otro compuesto químico, de manera que obtenemos semiconductores de tipo N y P [17, 23, 24].

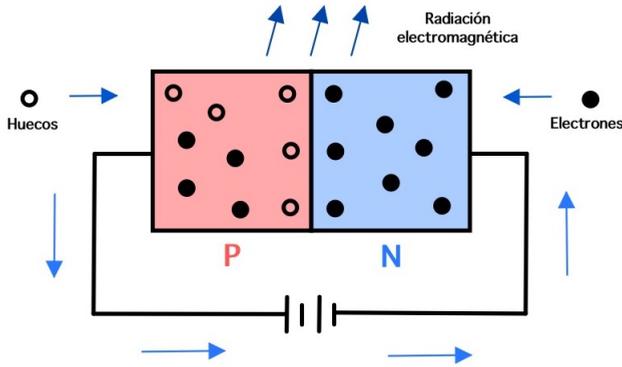


Figura 2.3: Recombinación de electrones y huecos en la unión P-N de un LED en polarización directa [25,26].

Un semiconductor tipo P se obtiene añadiendo al silicio una pequeña cantidad de un elemento con tres electrones en su capa de valencia. Con ello se aumenta considerablemente su número de portadores de carga libre positiva (huecos) existentes en el cristal. Cuando se añade el material dopante, el cristal se queda con un número inferior de electrones en la capa externa de los átomos de los que podría almacenar el cristal sin doparse. Un semiconductor tipo N se obtiene añadiendo un elemento con cinco electrones en su capa de valencia al cristal de silicio. Con ello aumenta el número de portadores de carga libre negativa (electrones) existentes en el cristal. Cuando se añade el material dopante, el cristal se queda con un número muy superior de electrones en la capa externa de los átomos a los que podría almacenar el cristal sin doparse [25,26].

El funcionamiento del semiconductor se basa en que, al aportarle energía a través de la conducción de corriente eléctrica, algunos electrones de la parte N salten a la banda de conducción del cristal generando un exceso de portadores. Cuando uno de estos electrones de la banda de conducción se combina con un hueco de la parte P, libera una energía al volver a la banda de valencia. La cantidad de energía liberada en cada recombinación es un valor constante y es función de los materiales dopantes utilizados en el cristal de silicio.

Esta energía se libera en forma de radiación electromagnética que se transmite en forma de *cuantos de energía (fotones)*. La cantidad de energía que contiene cada uno de estos fotones es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) y ν la frecuencia de la radiación producida por el fotón.

Si la energía que se libera al recombinarse los electrones es pequeña, dicha energía se emitirá en forma de ondas infrarrojas de, relativamente, baja frecuencia. Si el electrón genera mayor energía, las ondas que emitirá el diodo tendrán una frecuencia más alta y se pasaría de emitir luz infrarroja a luz visible: roja, naranja, amarilla, verde, azul, violeta y ultravioleta. Estas distintas longitudes de onda se forman combinando distintas proporciones de materiales en el dopaje del silicio [25, 26].

Los voltajes de operación para alcanzar la corriente nominal para la que están diseñados los LED's van desde 1.8 V hasta los 3.8 V (dependiendo de los materiales dopantes de fabricación y, por tanto, del color de la luz que emiten). Cuanto más alto sea el valor de la frecuencia de la emisión de la luz deseada mayor será la caída de tensión requerida en el semiconductor. De este modo, pasaremos de los 0.6 V para un diodo normal no emisor de luz, a 1.3 V para un LED infrarrojo, 2.1 V para un LED rojo, 3.0 V para uno verde, y 3.3 V para un LED azul y más de 5.0 V para un LED ultravioleta (estos valores son un cálculo promedio y pueden variar en función de los distintos procesos de fabricación) [27].

En los años 80's se desarrollaron dispositivos de alta eficiencia en rojo, naranja y amarillo (LED AlGaInP). A principios de la década de los 90's se desarrollaron dispositivos de alta definición en violeta, azul y verde (LED GaInN). Por tanto, a mediados de la década de 90's, se disponía de dispositivos monocromáticos de alta eficiencia que cubrían todo el espectro visible [28, 29].

Uno de los grandes avances en la tecnología de iluminación LED es el LED blanco desarrollado en Japón en 1997 [28, 29]. Actualmente hay tres sistemas principales para crear luz blanca, como se observa en la Fig. 2.4.

El primero es un sistema de tres longitudes de onda que se muestra en la Fig. 2.4(a), para crear luz blanca mediante la combinación de tres LED's: rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue). El uso de tres colores (RGB) para crear la luz blanca requiere de una fuente de alimentación para cada LED para equilibrar sus intensidad luminosa. Y lo que es peor, cada fuente tiene sus propias características de iluminación específicas que proporcionan una mezcla de color desigual en una superficie reflejada, lo que da como resultado una iluminación inadecuada. El segundo sistema para producir la luz blanca es a través de un LED azul y una luz amarilla fluorescente. Los LED blancos en forma de bala (tipo azul-YAG) disponibles comercialmente en la actualidad, Fig. 2.4(b) se pueden aplicar en: luces de fondo para pantallas de cristal líquido, iluminación, pantallas de pared, etc. Los ojos humanos reconocen la mezcla de colores azul y amarillo como blanco (casi blanco), pero tiene algunos inconvenientes. Debido a que los dos colores son complementarios, el color de luz

creado puede estar sujeto al aislamiento del matiz y a la dependencia significativa del color en la temperatura y la corriente; y tiene propiedades suficientes de reproducción del color debido a la falta de elementos de color verde y rojo. El aislamiento del tono de los colores azul y amarillo aparece en la superficie iluminada [28].

Por ultimo, el tercer sistema usado para definir la luz blanca, es mediante la mezcla de un LED casi ultravioleta con una sustancia fluorescente con colores rojo, verde y azul. La Fig. 2.4(c) muestra la estructura y las características de un LED blanco de tipo de sustancia fluorescente excitado por radiación casi ultravioleta. El principio de la iluminación LED blanco excitado por un rayo casi ultravioleta fue inventado por Taguchi [27]. Este principio se asemeja al de una lámpara fluorescente de tres longitudes de onda en el que la luz ultravioleta cercana se convierte en luz visible a través del proceso de fotoluminiscencia en la sustancia fluorescente. Esta tecnología proporciona un LED blanco con una calidad superior a la del tipo azul-YAG. Estos dos tipos de LED blanco de tipo de conversión fluorescente son diferentes en los principios físicos de creación del color blanco. En el tipo azul-YAG, la luz azul aguda de un LED azul es un elemento inevitable para la configuración del color blanco que, sin embargo, se ve fuertemente afectado por la temperatura y la corriente directa. Por otro lado, la luz ultravioleta cercana no es un elemento que crea directamente el color blanco y, por lo tanto, proporciona características de mezcla de color lo suficientemente adecuadas y una distribución de luz uniforme [27].

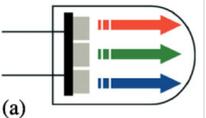
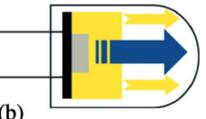
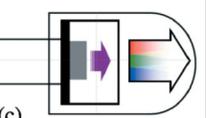
Construcción del LED blanco	Patrón en la superficie reflejada	Características
 <p>(a)</p>		<p>Tipo multi-chip</p> <ul style="list-style-type: none"> • Control de un LED de tres colores (que requiere de activación de circuitos complicados). • Imposible obtener la distribución uniforme de la luz. • No adecuado para la fuente de iluminación.
 <p>(b)</p>		<p>Tipo un solo chip</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quasi-blanco obtenido a través del LED azul + sustancia fluorescente amarilla. • Imposible obtener la distribución uniforme de la luz. • Incompleto para la fuente de luz.
 <p>(c)</p>		<p>Tipo un solo chip</p> <ul style="list-style-type: none"> • Luz blanca obtenida a través de un nuevo LED ultravioleta + sustancia fluorescente con colores rojo, verde y azul. • Distribución de la luz a través de l alto rendimiento del comportamiento del color. • La mejor fuente de luz para la iluminación.

Figura 2.4: Construcción y características del LED blanco: (a) LED de color RGB, casi blanco; (b) a través de un LED azul y blanco fluorescente; y (c) a través del LED ultravioleta cercano y RGB [27].

Se requiere de luz de alta calidad para una fuente de luz blanca. Esto se debe a que vemos el color reflejado en una sustancia cuando miramos la sustancia. El espectro de la fuente de luz afecta la superficie de una sustancia, un fenómeno conocido como *reproducción de color*. Si el espectro de una fuente de color no es equivalente a la luz solar o la luz de una bombilla de filamento, el color de la sustancia se reconoce como diferente a la natural. En la región cercana al ultravioleta, sí se encuentra un elemento fluorescente con mayor eficiencia o un material con mayor durabilidad, se obtendrá un LED blanco con un mejor rendimiento de reproducción de color y una mayor eficacia luminosa.

Las investigaciones relacionadas con las tecnologías ópticas y la luz, han pasado de los laboratorios y los centros de investigación a los medios de comunicación de carácter general gracias a acontecimientos como el otorgamiento del premio Nobel de física 2014 a los japoneses Isamu Akasaki y Hiroshi Amano, y al estadounidense Shuji Nakamura por el descubrimiento del LED azul [25, 30]. El citado Premio Nobel apoya una invención que ha tenido un rápido desarrollo tecnológico y que empieza a estar cada vez más presente en la iluminación de los hogares y espacios públicos, conviviendo con tecnologías tan antiguas como el filamento de wolframio, calentado gracias al inevitable efecto Joule, y que ha experimentado un nuevo resurgimiento en forma de pequeñas ampollas halógenas situadas en el interior de bombillas convencionales. En este sentido, actualmente vivimos un momento de cambio tecnológico, uno más de tantos pero ni por ello menos trascendente. No siempre es posible vivir una situación en la que tecnologías antiguas (filamentos) se reinventan (halógenas), tecnologías maduras mejoran y abaratan costes (fluorescentes) y tecnologías incipientes (LED) intentan abrirse camino y ganar cuota de mercado lo antes posible.

2.3.2. HP-LED

El LED es un dispositivo semiconductor de estado sólido, que convierte directamente la energía eléctrica en luz. El HP-LED está atrayendo el interés debido a su impacto significativo en la industria de iluminación de estado sólido [31, 32] y es un candidato fuerte para la próxima generación de aplicaciones de iluminación general. El uso de HP-LED para la iluminación pública es un tema emergente [33], desencadenado por desarrollos recientes de diferentes tecnologías, incluidos materiales semiconductores [34], técnicas de fluorescencia [35], electrónica de control [36] o control térmico [37], entre otros.

Al considerar la gestión térmica de los HP-LED, se deben considerar dos desafíos principales. En primer lugar, aunque un solo dispositivo consume una potencia relativamente baja, existen grandes flujos de calor en la zona del núcleo, que son del

orden de 300 W/cm^2 o más.

Estos altos flujos de calor a menudo requieren excelentes disipadores de calor en el núcleo para ayudar a disipar tales cargas de calor concentradas. En segundo lugar, dado que la salida luminosa de un LED individual es insuficiente para reemplazar una fuente de luz tradicional, son necesarios múltiples LED para la iluminación general. Con el uso de núcleos LED's grandes, es posible generar grandes cargas de calor en el sistema que pueden causar problemas para la disipación total del calor, especialmente cuando los requisitos de refrigeración requieren métodos pasivos. Múltiples lámparas LED generalmente se conectan en paralelo para obtener niveles de iluminación suficientes, Fig. 2.5. Con el desarrollo de la tecnología de epitaxia, paquete e integración, la eficiencia del HP-LED se vuelve más alta.

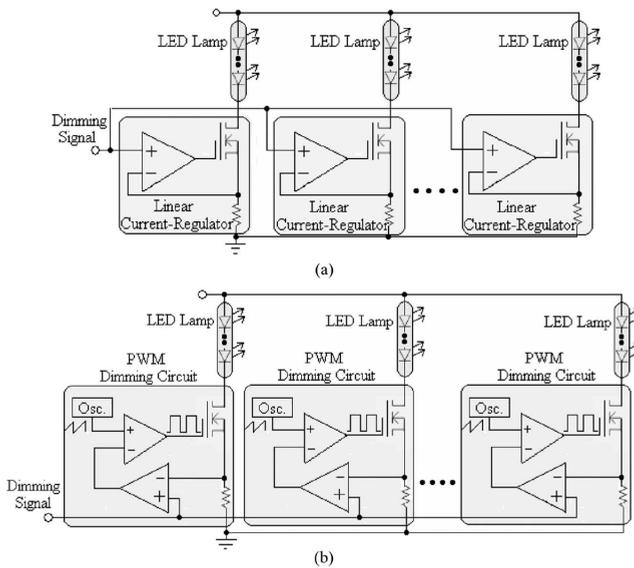


Figura 2.5: Conexión interna (paralelo) de un HP-LED [34].

En la actualidad, los métodos utilizados para resolver el problema del calor de sistemas LED's se deben principalmente al cambio del material del disipador del LED. Sin embargo, cuando el LED de alta potencia se aplica a la iluminación y otros usos, el control del costo es muy importante, el tamaño del disipador de calor externo del LED no puede ser grande y no se permite el uso de ventiladores para enfriamiento adicional (desde los puntos de vista de la economía y la fiabilidad). Por lo tanto, los métodos existentes no pueden superar el problema térmico del LED de alta potencia de manera efectiva. Además de la restricción anterior, otros aspectos prácticos como un diseño compacto, bajo costo, producción en masa o

incluso consideraciones estéticas pueden desempeñar un papel importante en los productos orientados al mercado.

2.3.3. Disipadores de calor

Un disipador es un instrumento que se utiliza para bajar la temperatura de algunos componentes electrónicos. Su funcionamiento se basa en la *Ley cero de la Termodinámica*, transfiriendo el calor de la parte caliente que se desea disipar al aire. Este proceso se propicia aumentando la superficie de contacto con el aire permitiendo una eliminación más rápida del calor excedente. Un disipador extrae el calor del componente que refrigera y lo evacúa al exterior, normalmente al aire. Para ello es necesaria una buena conducción de calor a través del mismo, por lo que se suelen fabricar de aluminio por su ligereza, pero también de cobre, mejor conductor del calor; cabe aclarar que el peso es importante ya que la tecnología avanza y por lo tanto, se requieren disipadores más ligeros y con eficiencia suficiente para la transferencia de calor hacia el exterior [38]. En el diseño de disipadores de calor la selección de materiales es fundamental [39].

Una forma de categorizar los disipadores de calor es mediante el mecanismo de enfriamiento empleado para eliminar el calor de los dispositivos. Se puede dividir en cinco categorías:

1. *Disipadores de calor pasivos*: se usan en aplicaciones de convección natural o en aplicaciones donde la disipación de calor no depende del suministro designado de flujos de aire.
2. *Disipadores de calor semiactivos*: aprovechan los ventiladores existentes en el sistema.
3. *Disipadores de calor activos*: emplean ventiladores designados para su propio uso, como disipadores de calor del ventilador ya sea en choque o en flujos verticales. Este tipo de disipadores de calor usualmente involucra componentes que se mueven mecánicamente y su confiabilidad depende en gran medida de la confiabilidad de las partes móviles.
4. *Placas frías enfriadas por líquido*: típicamente emplean diseños de bloques de tubos en ensambles soldados para el uso de agua bombeada, aceite u otros líquidos.
5. *Sistema de re-circulación de cambio de fase*: incluye sistemas de dos fases que emplean un conjunto de caldera y condensador en un mecanismo pasivo auto-accionado. Los sistemas de calor de tubería no incorporan una disposición alimentada por gravedad. Esta categoría también incluye sistemas sólidos.

dos a líquidos, pero generalmente se usan para moderar gradientes transitorios de temperatura en lugar de disipar el calor.

Los disipadores de calor también pueden clasificarse en términos de métodos de fabricación y sus perfiles de forma final. Los tipos más comunes de disipadores de calor refrigerados por aire incluyen [40]:

- *Estampados*: se utilizan en el enfriamiento de aire tradicional de componentes electrónicos y ofrecen una solución de bajo coste para problemas térmicos de baja densidad. Son adecuados para la producción de alto volumen y las herramientas avanzadas con estampado de alta velocidad reducirían los costos. Las opciones adicionales de ahorro de mano de obra y materiales de interfaz se pueden aplicar de fábrica para ayudar a reducir los costos de ensamblaje de la placa.
- *Extrusiones*: éstas permiten la creación de formas bidimensionales elaboradas, capaces de disipar grandes cargas de calor. Se pueden cortar, maquinarse y añadir opciones. Un corte transversal producirá disipadores de calor omnidireccionales, mejora el rendimiento en aproximadamente un 10 – 20 %, pero con una velocidad de extrusión más lenta.
- *Bondem / Aletas fabricadas*: la mayoría de los disipadores de calor enfriados por aire son de convección limitada, y el rendimiento térmico general de un disipador de calor enfriado por aire, en ocasiones, puede mejorarse significativamente si se expone más área de superficie a la corriente del aire. Estos disipadores de calor de alto rendimiento utilizan epoxi cargado de aluminio, térmicamente conductor, para unir aletas planas en una placa base de extrusión ranurada.
- *Piezas fundidas*: esta tecnología se utiliza en los disipadores de calor de aleta pin-fin de alta densidad que proporcionan el máximo rendimiento cuando se usa refrigeración por compresión.
- *Aletas plegadas*: la chapa corrugada en aluminio o cobre aumenta el área superficial y, por tanto, el rendimiento volumétrico. El disipador de calor se conecta a una placa base o directamente a la superficie de calentamiento por medio de epoxidación o soldadura fuerte. No es adecuado para disipadores de calor de alto perfil, debido a la dificultad de adquirir aletas plegadas de más de 50 mm, y desde el punto de vista de la eficiencia de la aleta.

Los mayoría de los disipadores suelen ser de **aluminio extruido** y **anodizados en negro**. La **extrusión del aluminio** es un proceso tecnológico que consiste en dar forma o moldear una masa de aluminio (calentada a 500° C) haciéndola salir por una abertura o matriz especialmente dispuesta para conseguir perfiles de diseño

complejo. El **anodizado** es un proceso electrolítico por el que se modifica la superficie del aluminio para formar una capa protectora. El aluminio se usa como ánodo y es dónde se produce la oxidación. Las superficies negras tienen una emisividad muy alta que favorece la radiación térmica.

El Aluminio 6061 es una aleación de Aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio; la proporción de aluminio debe oscilar entre el 95.85 % y el 98.56 %. Originalmente denominado *Aleación 61S*, fue desarrollada en 1935 y es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas y, recientemente, en el diseño de disipadores de calor; es fácil de maquinar y resistente a la corrosión. Sus principales propiedades físicas se muestran en la Tabla 2.2 [41–43].

Propiedades físicas	
Densidad (gr/cm)	2.7
Coef. de dilatación (0 a 100° C)($1 * 10^6$ 1/° C)	23.6
Rango de fusión (° C)	575 - 650
Conductividad térmica (0 a 100° C) (W/m° C)	Temple T6: 167
Módulo de elasticidad (MPa)	69500
Resistividad a 20° C ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Temple T6: 4.0
Coefficiente de Poisson	0.33
Calor específico (0 a 100° C)	940

Tabla 2.2: Propiedades físicas del Aluminio 6061 [43].

La geometría de la superficie del disipador de calor es importante e influye más en la transferencia de calor desde el encapsulado del LED al ambiente. La generación de calor extra da como resultado muchos problemas para los LED's, lo que afecta su vida útil, estabilidad, cambio de longitud de onda y eficiencia luminosa. Por lo tanto, el manejo del calor es uno de los temas más importantes en la investigación LED de alta potencia actualmente.

2.3.4. Características lumínicas de los LED's

Las características lumínicas que más rápidamente se asocian a los LED's son valores altos de eficiencia energética y vida útil mientras que, desde el punto de

vista comercial a la hora de seleccionar un equipo de iluminación, los parámetros más analizados son el precio de compra del equipo y los costes de operación, donde podemos incluir los gastos de energía y mantenimiento.

A modo de comparación de las fuentes tradicionales de iluminación, los LED's se basan principalmente en elementos semiconductores, mientras que las lámparas de incandescencia, los fluorescentes y las lámparas de descarga están basadas en un cerramiento de cristal relleno de gases que incluyen filamentos, electrodos y/o recubrimientos con propiedades lumínicas.

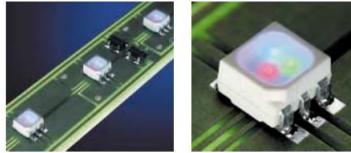


Figura 2.6: Chip LED [44].

La emisión de luz en estado sólido, como también se denomina genéricamente a la iluminación LED, parte de un pequeño cristal de silicio, de tamaño muy reducido que ronda el milímetro cuadrado Fig. 2.6 [44]. La emisión que produce es fruto del proceso electrónico que produce la corriente eléctrica al pasar por una unión semiconductor. Lo que se conoce tradicionalmente como un LED es, en realidad, un encapsulado que incluye uno o varios de estos cristales y que perjudican muy negativamente su funcionamiento. Por esta razón, los encapsulados han tenido que evolucionar, de bloques de plástico o resinas epoxy a sistemas estudiados realizados con complejas combinaciones de materiales cerámicos y metálicos. El dispositivo que resulta de unir todos estos componentes son dispositivos que pueden producir cada uno de ellos una luz por encima del centenar de lúmenes, que pueden ser utilizados y alimentados de manera individual o en grupos o matrices y acoplados a lámparas, luminarias o incluso a elementos estructurales.

De manera más específica las características fuertes diferenciales de la tecnología LED son:

- *Emisión direccional de la luz:* una matriz de LED's montados sobre una superficie plana, emiten la luz siempre de forma hemisférica en lugar de esférica. Esto permite optimizar en gran medida la eficiencia de extracción de la luz de las lámparas al reducir las pérdidas por reflectores y puntos muertos.
- *Tamaño compacto y de bajo perfil:* el pequeño tamaño y la capacidad de direccionar la luz ofrece un campo totalmente nuevo de aplicaciones en el mundo de la iluminación de aplicaciones compactas, potentes y con una alta capacidad de flexibilidad y adaptación a problemas específicos. Sin embargo, estás

aplicaciones deben estar bien diseñadas y estudiadas de manera que siempre se garantice una evacuación suficiente del calor generado en los LED's para que sean fiables y no se degraden rápidamente.

- *Resistencia a la rotura:* los emisores LED son muy robustos ante vibraciones, porque no tienen filamentos, cerramientos de cristal y, en general, ningún tipo de pieza móvil o frágil. Además, se basan en un encapsulado de plástico que incluye el cristal de silicio que genera las emisiones. Las conexiones internas se realizan por uniones soldadas, que a pesar de ser el punto más débil del sistema, aguantan sin ningún problema altos impactos.
- *Temperatura de trabajo:* las temperaturas bajas de trabajo son un problema para el funcionamiento eficiente de las lámparas fluorescentes. En estas condiciones, la tensión de arranque necesaria es mucho más alta, el tiempo de arranque se ralentiza y el flujo luminoso se reduce considerablemente. Por ejemplo, a una temperatura ambiente de 0° C, el flujo luminoso nominal de una lámpara fluorescente se reduce por debajo del 50 %. Sin embargo los LED's tienen una naturaleza totalmente opuesta, aumentando su eficiencia cuanto más baja es la temperatura de trabajo. Por lo que son especialmente indicados para su uso en cualquier aplicación donde se trabaje en estancias refrigeradas y en entornos con climas adversos en invierno.

Este aspecto es también el principal problema de la tecnología LED; como ya se menciono anteriormente, el principio de funcionamiento del LED implica la generación de calor, que modifica su modo de funcionamiento y si no se gestiona eficientemente su evacuación, va a limitar la funcionalidad y la vida útil de la lámpara.

- *Encendido inmediato:* las lámparas fluorescentes, especialmente aquellas que contienen mercurio, no ofrecen de manera instantánea todo el flujo luminoso al encenderse. Este tipo de productos pueden llegar a necesitar hasta 3 minutos antes de alcanzar su estado estable de funcionamiento. Las lámparas de alta intensidad tienen unos tiempos de arranque aun más largos, desde varios minutos para los haluros metálicos, y hasta 10 minutos o más para las lámparas de sodio. Estas lámparas tienen además un tiempo mínimo de re-encendido, si se apagan se debe garantizar un tiempo mínimo de enfriamiento antes de poder volver a conectarse, lo que normalmente lleva unos 10 o 20 minutos. La última generación de lámparas de alta intensidad de descarga han mejorado este tiempo hasta reducirlo a un período de entre 2 y 8 minutos. La tecnología LED, por el contrario, alcanza el nivel de brillo máximo casi de manera instantánea y sin necesidad de tiempos de espera. Las luces de freno y las intermitentes fabricados con tecnologías LED se encienden entre 170 y 200 milisegundos más rápidamente que las tecnologías usadas tradicional-

mente, lo que permite mejorar la seguridad de los conductores.

- *Alta capacidad de conmutación:* las fuentes de luz tradicionales fallan de manera catastrófica si se enciende y apagan con una alta frecuencia. En las lámparas de incandescencia el filamento de tungsteno se degrada con cada hora de funcionamiento. Cada vez que se enciende la bombilla se produce un pico de corriente de arranque que degrada mucho más rápidamente a este filamento. En fluorescentes y lámparas de alta presión de descarga, los altos voltajes de arranque erosionan los electrodos. En general, las lámparas fluorescentes se clasifican con diferentes tiempos de vida en función de la frecuencia de encendido y apagado, alcanzándose los valores más altos cuando se garantizan períodos de encendido y apagado por encima de 12 horas. Las lámparas de alta presión tienen unos tiempos de arranque y de refrigeración muy altos por lo que no es posible una conmutación rápida de las mismas. La vida útil y el mantenimiento de la luminosidad, no se ve afectada por los ciclos de encendido y apagado en los LED's. De este modo, son muy útiles para cualquier aplicación que implique intermitencias, como sensores de ocupación o indicadores de eventos.
- *Posibilidad de regulación del nivel de brillo:* las fuentes de luz tradicionales eficientes presentan muchos problemas respecto a su regulación luminosa. La regulación de sistemas fluorescentes es un hito tecnológicamente superado de manera efectiva, aunque se requiere un equipo con un coste sustancialmente alto. En aplicaciones con halogenuros, la regulación es un punto más problemático, con soluciones complejas y que no permite alcanzar rangos de regulación completos (0 – 100 %) estando limitado inferiormente a valores mínimos de un 30 %. Los LED's ofrecen muchas facilidades en términos de control de sus niveles de emisión manteniendo o incluso aumentando sus parámetros de eficiencia. Son sistemas electrónicos, controlables por sistemas digitales de gestión, remotos o autónomos, que abren un abanico de posibilidades de desarrollo muy amplio.
- *No generan emisiones infrarrojas o ultravioletas en emisores de rangos visibles:* los niveles de flujo luminoso de los LED's diseñados para emitir diferentes colores responden de manera diferente a las variaciones de temperatura. Los colores amarillo y rojo son los más sensibles mientras que el azul es el menos sensible. Estos diferentes comportamientos de los colores hacen que los sistemas que generan la luz blanca a través de la combinación RGB sean especialmente sensibles a la temperatura en el aspecto de la estabilidad de la luz emitida. Los equipos que producen la luz blanca a través de la emisión azul y su conversión, en parte, a luz amarilla con una capa de fósforo son mucho más estables en este aspecto.

En resumen, las principales características de las lámparas LED son especialmente su eficiencia y duración, comparándolas con otras tecnologías de iluminación. Teniendo en cuenta que un lumen es una medida de la cantidad total de luz visible emitida por una fuente dada y que una fuente de luz blanca es, por definición, no monocromática, el máximo rendimiento luminoso teórico se sitúa en 250 lm/W. La ley de Haitz prevé para los LED una disminución exponencial en el coste por lumen y un aumento en el rendimiento luminoso que alcanzaría los 200 lm/W en 2020 si se destinan los recursos necesarios para investigación. Sin embargo, en 2015 la tecnología LED ya superó los 100 lm/W, un valor que, aunque siendo elevado, es similar al obtenido por otras categorías.

En la actualidad, no todas las lámparas LED alcanzan los 100 lm/W, de hecho la mayoría tienen un rendimiento luminoso muy inferior y sólo los modelos más avanzados de los principales fabricantes se aproximan a ese valor. Las nuevas tecnologías van encaminadas hacia la optimización de los diodos orgánicos OLED (Organic Light-Emitting Diode), que sustituyen los costosos materiales inorgánicos que forman los semiconductores P y N por moléculas orgánicas que tienen un coste muy inferior. Entre sus ventajas cabe mencionar que son más delgados y flexibles, tienen menor consumo y son más económicos, tanto en los componentes como en la tecnología necesaria para su fabricación. Entre los retos que se deben afrontar están el aumento de la vida útil para aproximarla a la de los LED, lograr que las tecnologías de fabricación puedan producir a gran escala con bajo coste y resolver el tema del reciclado para evitar problemas de contaminación medioambiental por parte de los componentes orgánicos [26].

2.3.5. Iluminación exterior

La Contaminación Lumínica (CL) se puede definir como cualquier afectación al medio natural que esté ocasionada por la iluminación artificial nocturna. Estas afectaciones son el resplandor luminoso de la cúpula celeste, la luz intrusa en habitantes, el deslumbramiento y, sobre todo, provoca un mayor consumo energético. Este fenómeno se da desde que la actividad humana empezó a utilizar la noche para el desarrollo de su civilización. A pesar de ello, no fue hasta los años sesenta del siglo XX cuando un grupo de astrónomos alertaron de las dificultades crecientes que tenían para conseguir hacer mediciones y observaciones en condiciones de oscuridad nocturna natural [45].

A medida que las eficiencias energéticas y las formas de los sistemas de alumbrado han ido aumentando, se han elevado los niveles de iluminación y, por tanto, la luz nocturna. Esta luz escapa de las ciudades y crea un halo de luz alrededor de ellas que se difumina por el cielo y llena la noche natural de este resplandor luminoso.

Este halo es debido a la reflexión o refracción de la luz en las partículas que forman la atmósfera (átomos o partículas en suspensión). También desde el espacio se puede ver el cambio de la morfología de la noche como puntos brillantes sobre la superficie de la Tierra. Cuanto más desarrollado está un país, mayor es su consumo energético y grado de iluminación y más afectado se ve por la contaminación lumínica, como puede comprobarse observando una foto nocturna del planeta [45–47], Fig. 2.7.



Figura 2.7: Vista nocturna de capitales europeas tomadas la misma noche desde la Estación Espacial Internacional [46,47].

En España, la propuesta de modelo de alumbrado exterior municipal para la protección del medio ambiente, la mejora de la eficiencia energética elaborada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), indica que el alumbrado público consume 4,700 GW/h por año y es responsable de la emisión a la atmósfera de 4,250,000 toneladas anuales de CO_2 . Se estima una capacidad potencial media de ahorro en este sector del 20 %, lo que significaría la reducción de las emisiones en unas 850,000 toneladas de CO_2 por año. La magnitud del consumo y de la inversión es verdaderamente significativa.

Además, el alumbrado público no es el único responsable de la CL; otros tipos de alumbrados exteriores como: deportivos, comerciales y publicitarios, polígonos industriales, etc., contribuyen al problema en una proporción que puede estimarse en torno al 20 %, como mínimo.

Es evidente que el alumbrado persigue un objeto importante en nuestra sociedad: *el servicio al ser humano*. La contaminación puede provenir de los siguientes factores [45]:

- *Emisión directa desde las fuentes de luz*: es la emisión de luz hacia el entorno oscuro. Puede ser hacia el cielo o hacia un hábitat de seres vivos. Es la causa más importante de contaminación, debido a la intensidad de la fuente contaminante.
- *Reflexión en las superficies iluminadas*: sobre calles, monumentos, etc. La reflexión es inevitable si queremos conservar el alumbrado, pero debe minimizarse si están utilizando niveles lumínicos superiores a los necesarios.
- *Refracción de la luz en las partículas del aire*: se trata de una variación del factor anterior, pero la luz, en lugar de reflejarse en una superficie sólida, interacciona con los átomos y las partículas de la atmósfera.

La relación entre la contaminación lumínica y la salud humana

La evidencia de que la luz artificial nocturna exterior influye en la salud es bastante sólida, pero ¿cómo se relaciona esto con la contaminación lumínica? El trabajo en este campo está comenzando apenas, se llevaron a cabo estudios en 147 comunidades de Israel utilizando fotografías satelitales para medir el nivel de luz artificial, después se sobrepusieron las fotos a un mapa en que se detallaba la distribución de los casos de cáncer de mama. Los resultados mostraron una correlación estadísticamente significativa entre la luz artificial exterior por la noche y el cáncer de mama, incluso tomando en cuenta la densidad de población, la afluencia y la contaminación ambiental.

Las mujeres que viven en barrios en los que la luz era suficientemente intensa como para leer un libro en el exterior a media noche, presentaron un riesgo del 73 % mayor de desarrollar cáncer de mama en comparación con aquellas que residen en áreas donde hay menos iluminación artificial exterior. Sin embargo, el riesgo de cáncer de pulmón no se vio afectado. Los hallazgos de publicaron en enero de 2008 [45].

Efectos de la contaminación lumínica

Dispersión hacia el cielo: es la desviación de la luz en todas direcciones, resultado de su interacción con moléculas del aire y partículas en suspensión (humo, polvo, etc.).

Intrusión lumínica: aparece cuando se emite luz en direcciones que exceden el área donde es necesaria, invadiendo zonas circundantes.

Deslumbramiento: se origina cuando la visibilidad se dificulta o imposibilita por el efecto de la luz del sol o la emitida por instalaciones de iluminación artificial. Las luces mal orientadas o con demasiada potencia deslumbran, hacen perder agudeza visual y generan zonas de sombra que dificultan la visión.

Sobreconsumo: con frecuencia la emisión de luz implica un consumo energético mayor del necesario debido al exceso de la intensidad, al horario de funcionamiento y a su distribución espectral. El gasto energético del alumbrado público de un municipio representa aproximadamente el 50 % del gasto energético público total.

Entre las consecuencias más significativas de este tipo de contaminación está el derroche de energía eléctrica y el elevado gasto público que conlleva. También son importantes los efectos medioambientales negativos ya que, un exceso de luz durante la noche impide la destrucción de ciertas partículas contaminantes del aire. El dióxido de nitrógeno y sus derivados se desintegran mediante una reacción química que depende mucho del nivel de oscuridad, por lo que la presencia de luz durante la noche llega a impedir que se destruya hasta un 5 % de esos contaminantes. Por tanto, una mayor contaminación lumínica también puede producir una mayor contaminación atmosférica [45, 48].

Efectos sobre la biodiversidad

Los efectos del exceso de luz sobre los ecosistemas y sobre la salud son preocupantes. Se calcula que un 63 % de la población mundial y un 99 % de la población de Europa y Estados Unidos (excluyendo Alaska y Hawái) vive en áreas donde, según la escala elaborada por la Unión Astronómica Internacional, la contaminación lumínica es un hecho *oficial*, es decir, donde la noche es un 10 % más brillante que la luminosidad natural del cielo por encima de los 45 grados.

La contaminación lumínica tiene efectos comprobados sobre la flora y la fauna nocturna. En algunos grupos faunísticos, como mamíferos, anfibios y gran número de insectos, la actividad biológica a pleno sol es escasa comparada con la que desarrollan desde el crepúsculo hasta el amanecer, precisando de la oscuridad para desarrollar su ciclo vital. La iluminación de playas y zonas costeras supone una agresión para la vida marina. La luz artificial durante la noche altera los ciclos de ascenso y descenso del plancton marino, base de la cadena alimenticia, y provoca que muchas especies de animales modifiquen sus pautas de comportamiento. El deslumbramiento y la desorientación en aves es otro de los efectos de la luz artificial, algunas especies pierden el rumbo y otras salen en busca de alimento más tarde de lo habitual. Los vegetales también sufren las consecuencias de un exceso de luz, que puede afectar a su fenología. Por ejemplo, se ha observado que los árboles de hoja caduca tardan más en perder las hojas en entornos con iluminación nocturna [48–50]. Otro ejemplo es el que se observa en la Fig. 2.8, donde podemos observar el lago de L’Albufera en Valencia de día (izquierda) y de noche (derecha), este lugar se caracteriza por ser un paisaje abierto, con una topografía muy llana, sin elementos naturales o artificiales que interfieran en la dispersión de la luz y con una gran masa de agua que multiplica el efecto de la luz [51].



Figura 2.8: Contaminación lumínica en el lago de L’Albufera de día (izq.) y noche (der.) [51].

Reducción de la contaminación lumínica en las ciudades

Una correcta iluminación en las ciudades implica beneficios económicos y sociales, mientras que un mal diseño del alumbrado tiene un coste económico y ambiental muy alto [48–50]. La reducción de la contaminación lumínica es, en realidad, una tarea bastante sencilla. Algunas de las soluciones que existen son las siguientes:

- *Instalación de iluminación sensible al movimiento*: los sistemas de alumbrado público sensibles al movimiento permiten encender las luces a medida que las

personas se aproximan, iluminando un área con antelación y reducción, con ello la gran cantidad de luz que se desperdicia a lo largo de calles o espacios públicos no transitados. Estos sistemas son ya más frecuentes en la actualidad en espacios interiores, sobre todo en edificios públicos.

- *Iluminación orientada hacia abajo con bombillas que estén cubiertas por arriba:* para una buena iluminación de las calles, las bombillas tienen que disponer de pantallas que cubran la parte superior y los laterales. Esto orienta la luz hacia abajo y reduce la cantidad de luz desperdiciada. Con esto nos aseguramos de que la luz ilumine el suelo y no el cielo.

- *Uso de diferentes tipos de luz:* cambiar las bombillas con otras de menor potencia es una manera sencilla de reducir la contaminación lumínica, aunque no se pueda utilizar de forma generalizada en todas las zonas habitadas. No obstante, sí es posible y deseable realizar una iluminación diferenciada, en función del uso y frecuencia de cada espacio, adecuando la densidad de puntos de luz y su potencia.

- *Reducción de la pérdida de luz en los espacios interiores:* la iluminación transmitida al exterior desde el interior de los edificios también contribuye a la contaminación lumínica. Para minimizar la cantidad de luz pérdida desde el interior de las casas, se deben tomar medidas como minimizar el consumo de energía eléctrica, encender sólo las luces de las estancias que se están empleando o emplear cortinas y persianas [48, 50].

Soluciones LED para la contaminación lumínica

El Comité Español de Iluminación ha desarrollado una *Guía para la Reducción del Resplandor Luminoso Nocturno* que, si se aplica en España, podría suponer un ahorro de más de la mitad en la iluminación exterior. España es el país de la Unión Europea que más energía consume en alumbrado público, seguidos por Francia y Alemania; y todo ello siendo uno de los países europeos con más horas de sol anuales. Alumbrar las calles y carreteras cuesta anualmente alrededor de 450 millones de euros, cantidad que podría reducirse a más de la mitad con una planificación adecuada.



Figura 2.9: Calle principal iluminada con tecnología LED [49].

La aplicación de la tecnología LED al alumbrado público permite mitigar la contaminación lumínica, Fig. 2.9. Los LED han permitido una gran mejora en la eficiencia energética del alumbrado público, impensable en años. El 98 % de la energía en estos nuevos sistemas de alumbrado público se emplea en iluminar la calle, mientras que sólo un 2 % se desperdicia en forma de contaminación lumínica. Una característica de los sistemas LED es su adaptabilidad a diferentes tipos de alumbrado público así como de calles y carreteras, proporcionando una iluminación uniforme con una alta eficiencia energética. Además de reducir el resplandor no deseado y la contaminación lumínica, el empleo de alumbrado público de este tipo también ahorra energía en comparación con lámparas tradicionales, una lámpara LED permite reducir el consumo de energía entre un 40 % y un 80 % [52].

Iniciativas Jurídicas

El consumo de energía para uso doméstico, industrial o para iluminación de las calles ha crecido en los últimos años, aumentando como consecuencia el problema de la contaminación lumínica. Sin embargo, los aspectos positivos de este tipo de contaminación, a diferencia de otros, es que se presenta una fácil solución y que desaparece de inmediato cuando apagamos las luces, sin tener efectos acumulativos. Las iniciativas jurídicas existen y están dando resultados positivos. A continuación, se mencionan algunas normativas, reglamentaciones y leyes a escala internacional que hacen referencia a la CL [49, 50, 52]:

- Real decreto 187/2011 de 18 de febrero de 2011, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.

- Reglamento 1194/2012 de la Comisión de 12 de diciembre de 2012, por el que se aplica la Directiva de Ecodiseño 2009/125/CE a las lámparas direccionales, lámparas LED y sus equipos. Incluidas sus modificaciones posteriores.
- Real decreto 1890/2008 por el que se aprueba el reglamento de la eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior.
- Reglamento CE N^o245/2009 de la Comisión 18 de marzo por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo relativo a los requisitos de diseño ecológico para lámparas, balastos y luminarias.
- Reglamento 874/2012 de la Comisión de 12 de julio por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al etiquetado energético de las lámparas eléctricas y luminarias.

2.3.6. Transferencia de calor

Transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido, un fluido o un gas, utilizamos el término *conducción* para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término *convección* se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. Por último, la *radiación térmica*, es la energía térmica emitida por los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas debido a su temperatura [53].

El análisis térmico calcula la distribución de temperatura en un cuerpo producida por algunos o todos los mecanismos. En todos ellos, la energía calorífica fluye desde el medio con mayor temperatura al medio con menor temperatura. La transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un medio interviniente, mientras que la transferencia de calor por radiación no lo necesita [53].

2.3.7. Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que la energía térmica se transfiere de un punto a otro por medio de la interacción entre los átomos o moléculas de la materia. La conducción tiene lugar en sólidos, líquidos y gases. No implica movimiento masivo de materia. Los gases transfieren calor por medio de colisiones directas entre las moléculas energéticas y su conductividad térmica es baja comparada con los sólidos debido a que son medios diluidos.

La conducción de energía en líquidos es igual a la de los gases, excepto que la situación es considerablemente más compleja ya que las moléculas están más cercanas entre sí y los campos de fuerza molecular ejercen una fuerte influencia sobre el intercambio de energía en el proceso de colisión. Los sólidos no metálicos transfieren el calor por medio de vibraciones reticuladas, por lo que no hay movimiento de los medios durante la propagación del calor. Los metales son mejores conductores que los no metales a temperaturas normales, ya que poseen electrones libres que transportan energía térmica [54].

La transferencia de calor por conducción obedece a la *Ley de Fourier*, que establece que la tasa de conducción de calor $Q_{conducción}$ es proporcional al área de transferencia de calor (A) y al gradiente de temperatura (dT/dx), o:

$$Q_{conducción} = -\kappa A \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.2)$$

donde K , es la conductividad térmica y mide la capacidad de un material para conducir el calor. Las unidades de κ son $W/m \cdot ^\circ C$ o $(Btu/s)/pulgada \cdot ^\circ F$. Para la capa plana que aparece en la Fig. 2.10, la tasa de conducción de calor viene dada por:

$$Q_{conducción} = -\kappa A \frac{(T_H - T_C)}{L} \quad (2.3)$$

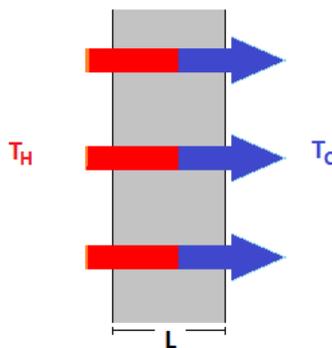


Figura 2.10: Tasa de conducción de calor [53].

La Fig. 2.11, muestra un rango de valores de la conductividad térmica para líquidos, sólidos no metálicos y metales puros a temperatura y presión normales [54].

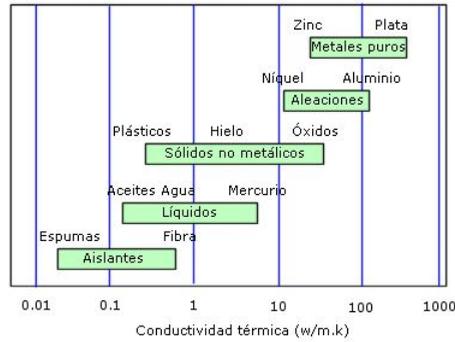


Figura 2.11: Conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ K$) [53].

2.3.8. Convección

La convección es el modo de transferencia de calor en donde el calor se transfiere desde la cara de un sólido a un fluido (o gas) adyacente en movimiento. La convección comprende dos elementos:

- Transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión).
- Transferencia de energía por movimiento macroscópico o masivo del fluido (advección).

A medida que la capa del fluido adyacente a la superficie caliente va adquiriendo mayor temperatura, su densidad disminuye (a presión constante la densidad es inversamente proporcional a la temperatura) y se vuelve flotante. Un fluido más frío (más pesado) y cercano a la superficie reemplaza al que se va calentando y así se forma un patrón de formas de circulación.

La tasa de intercambio de calor entre un fluido de temperatura T_f y la cara de un sólido de área A a temperatura T_s se rige por la *Ley de Enfriamiento de Newton*, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_{convección} = hA(T_s - T_f) \quad (2.4)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Las unidades de h son $W/m^2 \cdot ^\circ K$ o $Btu/s \cdot pulgada^2$. El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) depende del movimiento, la geometría y las propiedades físicas y termodinámicas del fluido.

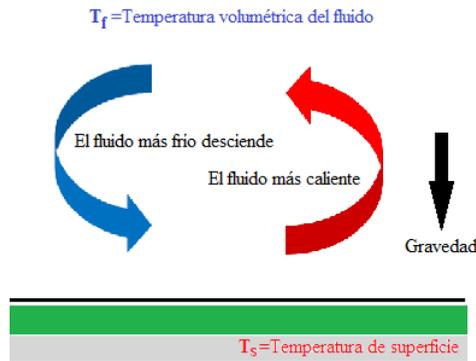


Figura 2.12: Formas de circulación de un fluido [54].

Por lo general, existen dos modos de transferencia de calor por convección:

- **Convección natural (libre)**

El movimiento del fluido adyacente a una cara sólida se origina debido a las fuerzas de flotación, inducidas por los cambios en la densidad del fluido y debido a las diferencias de temperatura entre el sólido y el fluido. Cuando se deja enfriar una placa caliente al aire libre, las partículas del aire adyacente a la cara de la placa se calientan, su densidad disminuye y, por lo tanto, empieza a elevarse, Fig. 2.12.

- **Convección forzada**

Se utiliza un medio externo, tal como un ventilador o una bomba, para acelerar el paso del flujo del fluido sobre la cara del sólido. El movimiento rápido de las partículas de fluido sobre la cara del sólido maximiza el gradiente de temperatura y aumenta la tasa de intercambio de calor. En la Fig. 2.13 se observa cómo se fuerza el aire sobre una placa caliente [54].

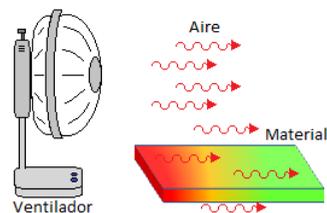


Figura 2.13: Convección forzada [54].

2.3.9. Radiación

La radiación térmica es la energía térmica emitida por los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas debido a su temperatura. Todos los cuerpos con temperaturas que estén sobre el cero absoluto emiten energía térmica.

Dado que las ondas electromagnéticas viajan en el vacío, no se requiere ningún tipo de medio para que exista la radiación. La Fig. 2.14 muestra el rango en longitud de onda de la radiación térmica comparado con la radiación emitida por otros medios (rayos X, rayos γ , rayos cósmicos, etc.) [54].

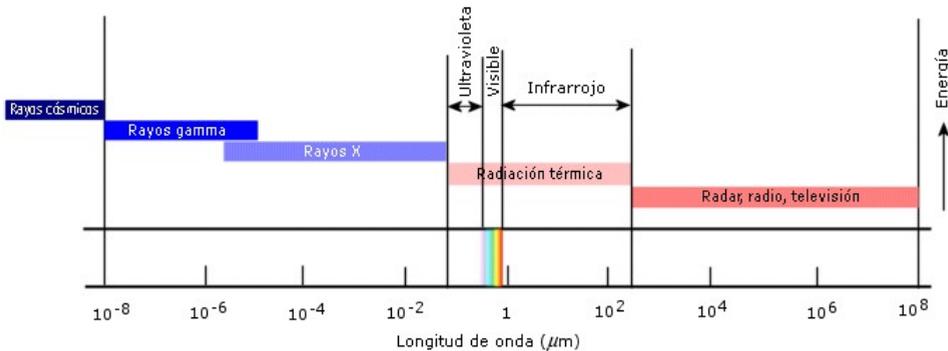


Figura 2.14: Longitud de onda (μm) [54].

La energía térmica del sol llega a la tierra por radiación. Dado que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, la radiación es el mecanismo de transferencia de calor más rápido que existe, Fig. 2.15.

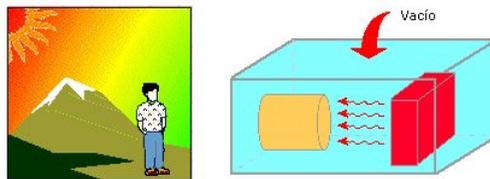


Figura 2.15: Energía térmica del sol [54].

La tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial A , y aumenta rápidamente con la temperatura, según la cuarta potencia de la temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$). La tasa también depende de la naturaleza de la superficie; esta dependencia se describe con una entidad ϵ llamada **emisividad**, un número adimensional entre 0 y 1 que representa la relación entre la tasa de radiación de una

superficie dada y la de un área igual de una superficie radiante ideal a la misma temperatura. La emisividad también depende de la temperatura. Así, la **corriente de calor por radiación** se puede expresar como:

$$H = A\epsilon\sigma T^4 \quad (2.5)$$

donde σ es la constante física fundamental llamada constante de Stefan-Boltzmann [54]. Esta relación se llama *Ley de Stefan-Boltzmann*. El valor numérico de σ es,

$$\sigma = 5.670400 * 10^{-8} (W/m^2 \cdot ^\circ K^4) \quad (2.6)$$

2.3.10. Efecto Joule

Se conoce como **efecto Joule** al fenómeno irreversible por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Según Joule: *una corriente eléctrica es justamente un movimiento de electrones. Éstos tienen masa, y velocidad, y adquieren cierta energía cinética*. Los conductores no son perfectos y el movimiento de esos electrones, además, es desordenado. Como resultado, se producen muchos choques, en donde parte de la energía cinética se transforma en energía calórica, la que termina elevando la temperatura del conductor [53]. La potencia calórica que se genera se expresa como:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.7)$$

En donde P representa la potencia, I la intensidad o corriente eléctrica y R la resistencia eléctrica. Como se observa, la intensidad esta elevada al cuadrado, lo que significa que el calor que se genera depende más de la corriente eléctrica que está circulando que de la resistencia del conductor.

2.4. Modelado numérico

En [55], se propone un sistema donde se mantiene la temperatura del chip LED por debajo de 70° C en condiciones reales, lo que, a largo plazo, permite el buen funcionamiento de la luminaria, con sus correspondientes ahorros en el consumo de energía y mantenimiento.

Basándonos en el modelado de [55], nuestro primer objetivo es calcular la distribución de temperatura en estado estacionario, sobre la superficie de un disipador de calor con una geometría con simetría de translación a lo largo de un eje, Fig. 2.16. Esta configuración es ideal para la producción en masa a un costo muy bajo a través de la inyección de aluminio. En nuestro modelado teórico hemos supuesto que el disipador de calor está hecho de aluminio anodizado (*AL6061*) que está rodeado por un flujo de aire laminar (ρ) dado por la ley de los gases ideales.

Uno de los conceptos aplicados es la ecuación de la continuidad que permite realizar el análisis de la distribución de calor en el aire:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2.8)$$

siendo \vec{v} la velocidad del aire y ρ la densidad del aire que cubre el disipador y está definida por la ley de los gases ideales. Además tenemos la ecuación de la energía [53]:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} - \rho \vec{g}, \quad (2.9)$$

donde t es el tiempo, P la presión y μ la viscosidad del aire. Suponemos que la aceleración de la gravedad \vec{g} es paralela al eje z . Debemos incluir en el modelado la ecuación del momento:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (2.10)$$

siendo C_p el calor específico, T la temperatura absoluta y κ la conductividad térmica del material. Debido a que se va a realizar un estudio en estado estacionario tenemos la siguiente condición:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.11)$$

Un detalle especial dentro del estudio realizado para el disipador es que, en la frontera, para una superficie de anodizado negro con una alta emisividad (≥ 0.8), el efecto de la irradiancia, que es el flujo de potencia por unidad de área ($\frac{W}{m^2}$), puede ser despreciado. Es decir, el flujo de salida \dot{q} se describe por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q} = \epsilon \sigma T^4, \quad (2.12)$$

donde ϵ es la emisividad de la pared de aluminio, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta del disipador, Fig. 2.16.

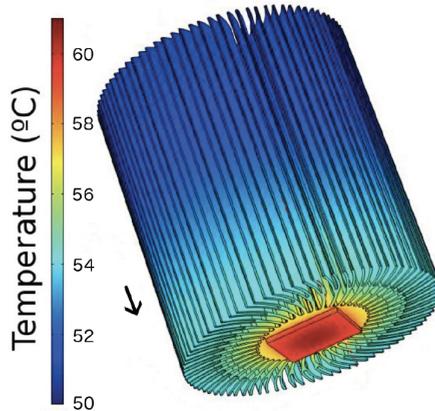


Figura 2.16: Simulación numérica de la distribución de temperatura sobre la superficie de un disipador de calor pasivo en configuración vertical. Los rangos de color van desde 50° C a 61° C [55].

2.5. Diseño numérico de la luminaria HP-LED

Con el propósito de resolver el problema anterior de un disipador de calor hecho de aluminio negro anodizado (*Al6061*) con la geometría mostrada en la Fig. 2.16. Con el propósito de integrar numéricamente el conjunto anterior de ecuaciones, hemos utilizado **SOLIDWORKS®** [56], que es un paquete comercial de solución de análisis basado en elementos finitos para diversas aplicaciones de física e ingeniería, especialmente en fenómenos acoplados. Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en la física, este software también permite el ingreso de sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales. En particular, hemos utilizado el módulo que da solución a la transferencia de calor, el cual proporciona interfaces de usuario para la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

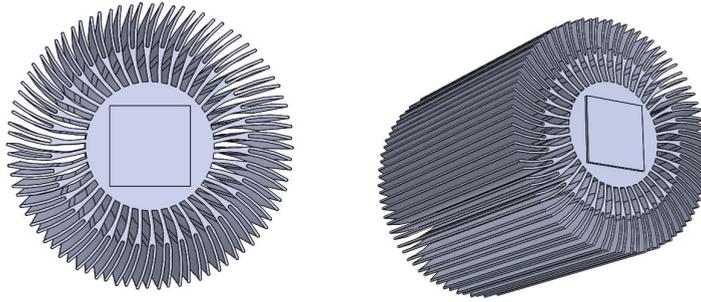


Figura 2.17: Luminaria para interiores: (izda.) vista frontal y vista lateral (dcha.).

2.5.1. Diseño de prototipo en SOLIDWORKS®

En el *Anexo I* se incluye de forma detallada el proceso que se llevó a cabo para crear el diseño de la luminaria de la Fig. 2.17 en SOLIDWORKS®. Para este trabajo de tesis en específico, se diseñaron disipadores de luminarias LED de las cuales ya se han obtenido prototipos e incluso se han introducido al mercado, debido a que cumplen con el objetivo de mantener la temperatura por debajo de los 70° C, además de cumplir con características como bajo coste y larga duración. A continuación se muestran dos diferentes tipos de luminarias LED (Fig. 2.17 y Fig. 2.18) las cuales fueron diseñadas en SOLIDWORKS® implementando paso a paso el desarrollo descrito en el *Anexo I*.

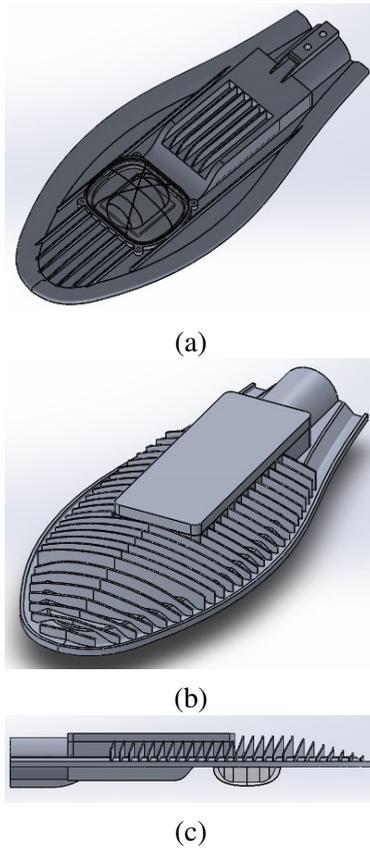


Figura 2.18: Luminaria para exteriores: (a) vista inferior, (b) vista superior y (c) vista lateral.

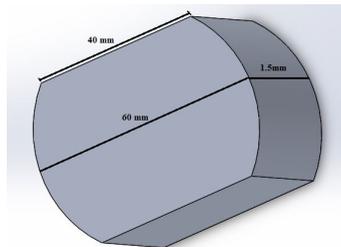


Figura 2.19: Dimensiones del diseño de la base chip LED en SOLIDWORKS®.

En la Fig. 2.19 se muestran las dimensiones del diseño de la base donde se coloca el chip LED diseñado en SOLIDWORKS® para la luminaria HP-LED, el cual hemos modelado como una placa de aluminio de 1.5 mm de espesor y de dimensiones de 60 mm, y 40 mm, el cual proporciona un flujo de calor constante en la

base del disipador de calor. Para los chips LED utilizados comúnmente en iluminación exterior, tema principal del presente trabajo, la cantidad de calor residual puede estimarse como el 70 % de la potencia del LED [55].

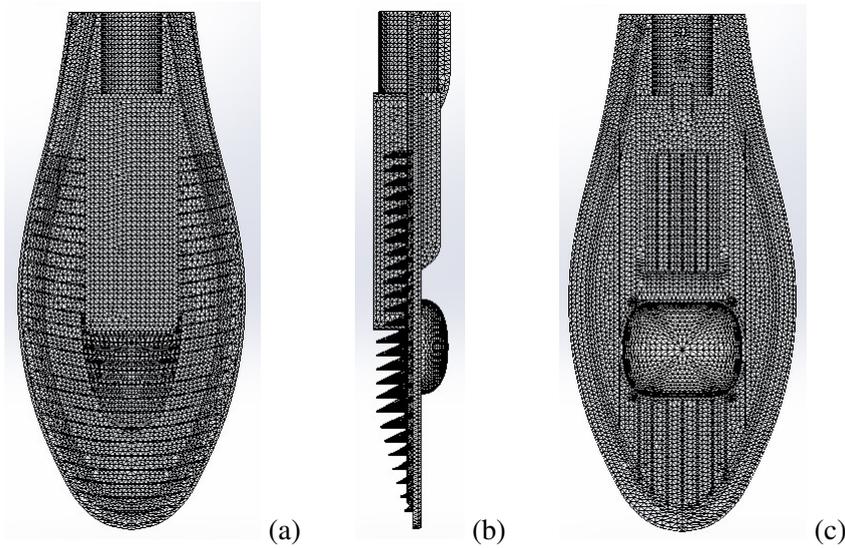


Figura 2.20: Malla sólida de luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®: a) vista superior, b) vista lateral y c) vista inferior.

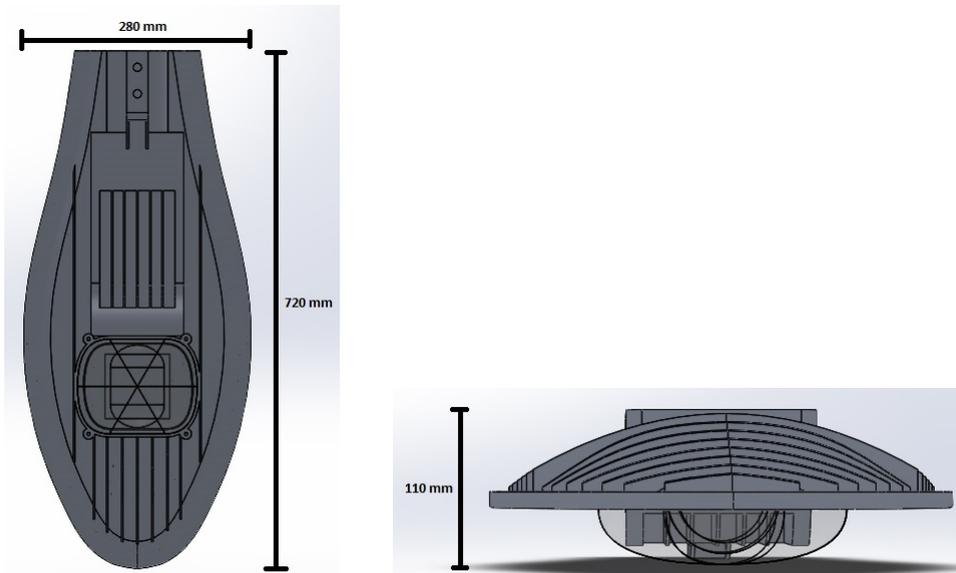


Figura 2.21: Dimensiones del diseño de la luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®.

La dependencia de la densidad del mallado se investigó cambiando la cantidad de puntos. La selección final se muestra en la Fig. 2.20, correspondiente a la simulación de un disipador de calor de dimensiones de 720 mm x 280 mm y una altura de 110 mm, Fig. 2.21.

A continuación en la Tabla 2.3 se muestran las cargas térmicas usadas en el diseño de la luminaria HP-LED, así como las características principales del material que se utilizó para el disipador de calor.

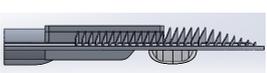
Modelo	Cargas térmicas	Material
	Potencia calorífica: 35 W Convección: $5,25 \text{ W/m}^2 \cdot K$	Aluminio: AL6061 Densidad: 2700 kg/m^3 Conductividad térmica: $154 \text{ W/m} \cdot K$ Calor específico: $896 \text{ J/kg} \cdot K$

Tabla 2.3: Cargas térmicas y material de la luminaria HP-LED.

2.5.2. Resultados de la simulación numérica.

Los resultados de los cálculos numéricos se muestran en la Fig. 2.22, para una configuración horizontal (es decir: el eje de simetría del disipador es perpendicular a la dirección de la aceleración de la gravedad, \vec{g}) y simulando el efecto de un chip LED de 35 W colocado en la parte inferior del disipador de calor.

Como puede apreciarse en la Fig. 2.22, el máximo valor de la distribución de temperatura está obviamente ubicado en el chip LED, y los valores de T (temperatura) disminuyen gradualmente con la distancia desde el chip mostrando una distribución radialmente simétrica alrededor de la perpendicular de la placa LED. Para una temperatura ambiente de 23° C , el resultado máximo de la distribución de estado estable es 47.1° C , muy por debajo de la temperatura crítica proporcionada por el fabricante LED (es importante mencionar que los resultados muestran los valores de la temperatura simulada menos la ambiente, en este caso, $47.1^\circ - 23.0^\circ = 24.1^\circ \text{ C}$, Fig. 2.22 y Fig. 2.23). En la Fig. 2.23 se muestra el comportamiento térmico de calentamiento/enfriamiento de la luminaria con esta configuración. Como mostraremos en secciones posteriores, este resultado concuerda bien con las mediciones experimentales realizadas en un sistema real.

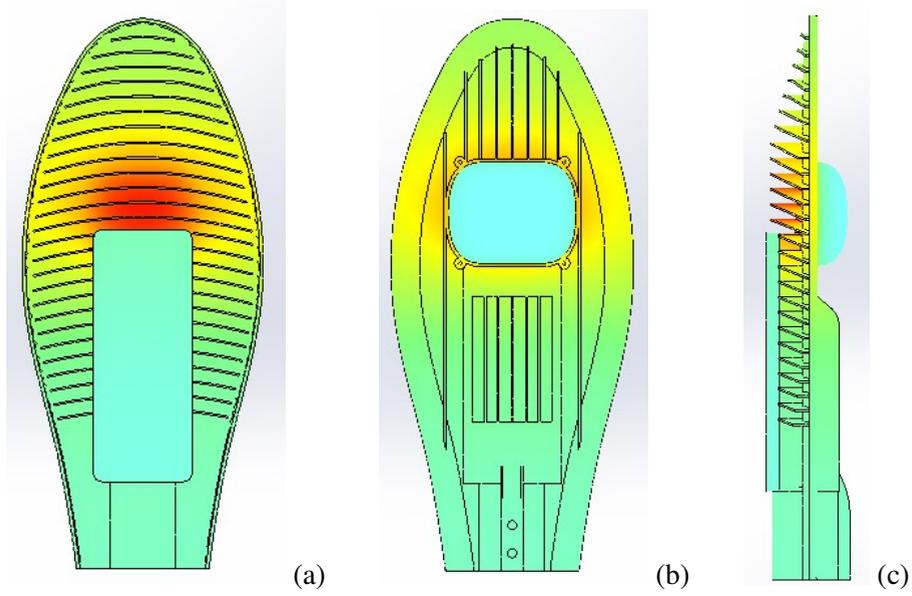


Figura 2.22: Simulación térmica de la luminaria HP-LED en SOLIDWORKS®: a) vista superior, b) vista inferior y c) vista lateral.

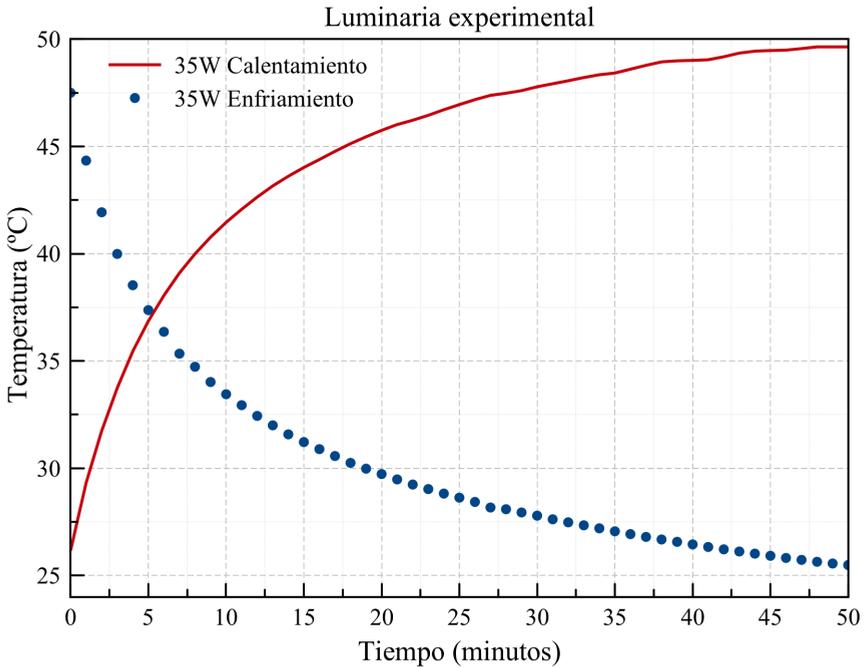


Figura 2.23: Comportamiento térmico: calentamiento y enfriamiento de la luminaria HP-LED obtenidos con SOLIDWORKS®.

Las simulaciones de la luminaria HP-LED por medio del software SOLIDWORKS®[®], se realizaron variando la potencia desde 25 hasta 60 W, en intervalos de 5 W, con un período de tiempo de simulación de 50 minutos. Las curvas de la Fig. 2.24 nos muestran la simulación del comportamiento térmico de la luminaria en su fase de calentamiento. A efecto de comparar en secciones posteriores los resultados numéricos con los experimentales, hemos considerado temperaturas iniciales en base a las condiciones reales del experimento, las cuales varían desde 23 a 28° C.

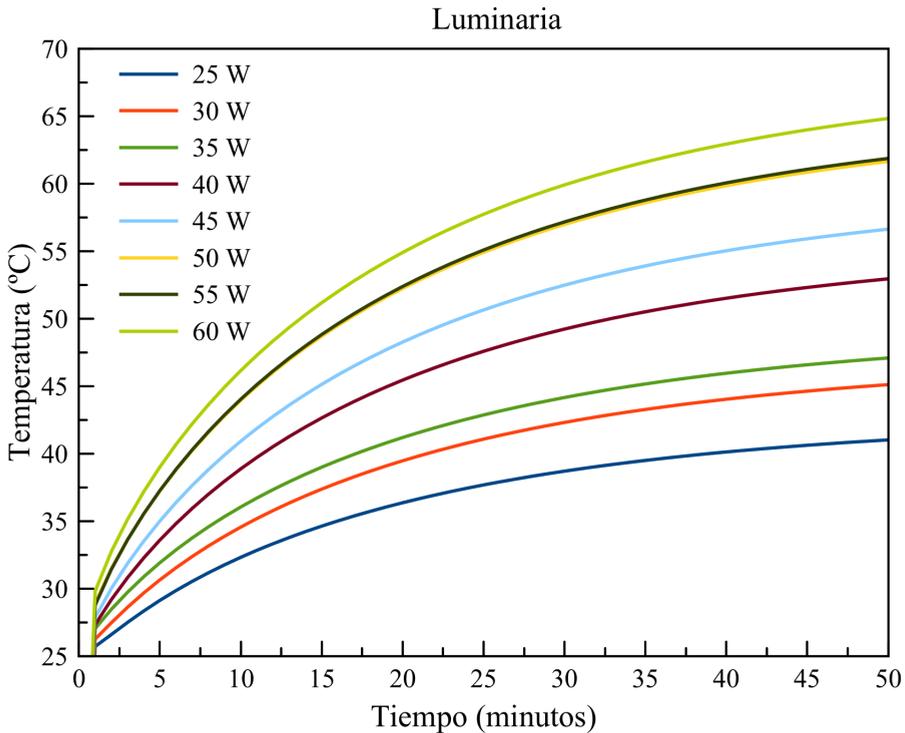


Figura 2.24: Comportamiento térmico de la luminaria HP-LED en fase de calentamiento a 35 W en SOLIDWORKS®.

En la Tabla 2.4 podemos observar los valores máximos de temperatura alcanzados en las curvas de calentamiento en cada una de las potencias simuladas, para la mínima potencia de 25 W la temperatura máxima es de 41.03° C y la temperatura máxima alcanzada es de 64.85° C que se obtiene utilizando una potencia de 60 W; con estas simulaciones se obtiene el comportamiento previamente esperado.

Potencia (W)	Temp. Calentamiento (° C)	Temp. Ambiente (° C)
25	41.03	24.46
30	45.12	25.24
35	49.8	23.0
40	52.96	26.3
45	56.64	26.61
50	61.67	27.8
55	61.89	24.79
60	64.85	23.46

Tabla 2.4: Valores máximos de temperatura para las potencias de 25 a 60 W.

2.6. Diseño experimental de la luminaria HP-LED

Con el propósito de verificar la validez de nuestro modelado numérico, se realizaron una serie de experimentos variando la potencia en una luminaria HP-LED. Se utilizó un disipador de calor de Aluminio anodizado (*Al6061*) con la misma geometría de la Fig. 2.21 conectado a un chip LED en el cual, se varía la potencia desde 25 hasta 60 W, con pasos de 5 W. En la Fig. 2.25 se muestra el esquema experimental utilizado para realizar la monitorización de las temperaturas de la luminaria HP-LED.

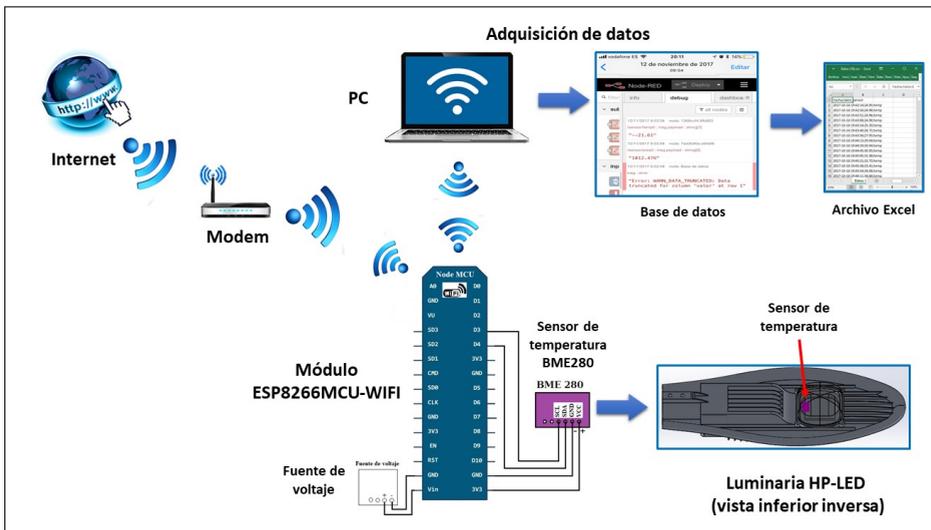


Figura 2.25: Esquema experimental para analizar el comportamiento térmico de la luminaria HP-LED.

El diseño experimental tiene conexión por medio de un sistema de internet inalámbrico a un módulo wifi arduino *ESP8266MCU* (un microprocesador *low cost* con WiFi integrado), es alimentado por una fuente externa de 3.3 V, en uno de sus puertos está conectado a un sensor ambiental *BME280* que mide variables como: temperatura, presión y humedad. Tal como se muestra en el esquema (Fig. 2.25), el sensor está ubicado dentro de la cúpula de vidrio de la luminaria en contacto con el chip LED y el disipador de aluminio. Los datos recolectados por el sensor son monitorizados cada minuto y enviados por medio de WiFi a una PC, donde se lleva a cabo la adquisición de datos por medio de una página Web provisional (193.146.46.139/luminaria), donde pudimos acceder a la base de datos y guardar los archivos en formato excel.

Para este caso en particular, solo hemos considerado los datos de temperatura, el sistema de sensado utilizado ofrece una mayor variedad de aplicaciones interesantes como la Iluminación Inteligente (*Smart Lighting*) en el ámbito de las Ciudades Inteligentes (*Smart Cities*).

Con la finalidad de minimizar la resistencia de contacto térmico entre el chip LED y el disipador de calor, se utilizó una película de grafito de alta conductividad térmica ($240 \frac{W}{m^{\circ}K}$). Finalmente, las luminarias se montaron sobre una mesa óptica, (Fig. 2.26), reproduciendo las condiciones de operación habituales. La emisividad del disipador de calor con el tratamiento de superficie de anodizado negro es 0.8. Los parámetros geométricos del modelo experimental son los mismos que en la simulación numérica desarrollada en la sección anterior. En este experimento se utilizó el sistema de monitorización con arduino-WiFi (*ESP8266MCU*) y un sensor de temperatura (*BME280*), una fuente de alimentación, un vatímetro y una computadora portátil para recopilar datos. En el recuadro inferior de la Fig. 2.26, se observa una vista inferior de la luminaria HP-LED.



Figura 2.26: Sistema real experimental de la luminaria HP-LED.

A continuación en la Fig. 2.27, se muestra la configuración real para la monitorización de temperatura de la luminaria HP-LED. En la Fig. 2.27 (a) se observa cómo está la luminaria encendida y conectada al sensor y a la fuente de alimentación; a continuación se observa más cerca cómo está conectado el sensor en la luminaria por la cara superior, Fig. 2.27 (b), y finalmente, en la Fig. 2.27 (c) podemos ver cómo va conectado el sensor en la parte interior de la luminaria.

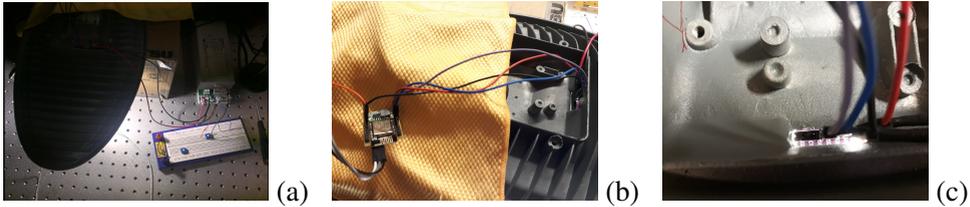


Figura 2.27: Configuración real de la monitorización : a) luminaria encendida, b) sensor de temperatura y c) conexión interior del sensor.

El patrón general para el flujo de aire podría describirse de la siguiente manera: *el aire de refrigeración entra desde la región exterior del dissipador de calor y se calienta al pasar a través de las aletas. El aire caliente se eleva hacia arriba en las regiones interiores del dissipador de calor debido al hecho de que la densidad del aire en estas zonas se hizo menor que la del aire circundante. Esto hace que se forme de manera discontinua una capa límite térmica, con un poco de retraso. Por tanto, se espera un coeficiente de transferencia de calor local relativamente alto en las regiones interiores del dissipador de calor.*

El dissipador de calor *pin-fin* mostrará un rendimiento de enfriamiento uniforme en caso de que se considere una convección natural. Por lo que aparecerán efectos de borde en las regiones externas del dissipador de calor, porque las aletas están diseñadas para mantener el flujo a cierta distancia en la dirección radial.

2.6.1. Resultados experimentales de la luminaria HP-LED

La Fig. 2.28 muestra las mediciones experimentales de calentamiento (C) y enfriamiento (E) de la luminaria HP-LED, variando la potencia desde 25 hasta 60 W, en intervalos de 5 W. Como se puede apreciar en las curvas, una vez que se enciende/apaga el chip LED, el tiempo de saturación es de aproximadamente 50 minutos; ya que a partir de este instante los valores de las curvas permanecen esencialmente constantes. Como se mencionó anteriormente, la medición de temperatura se realizó cada minuto.

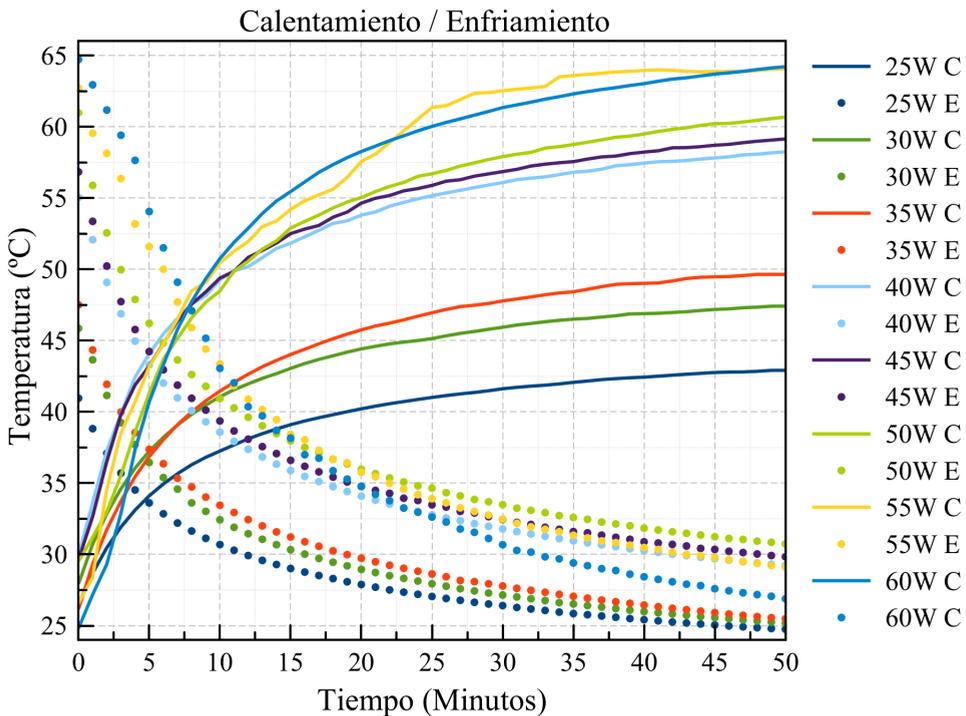


Figura 2.28: Calentamiento/enfriamiento experimental de la luminaria HP-LED.

Como podemos observar, las temperaturas de calentamiento no sobrepasan la temperatura crítica de 70°C , las temperaturas ambiente de estas curvas oscilan desde los 25° a 30°C . Los valores máximos de temperatura se presentan en la Tabla 2.5, en ella observamos que para una potencia de 25 W se alcanza una temperatura máxima de 40.75°C y de 62.92°C para una potencia de 60 W.

Potencia (W)	Temp. Calentamiento (° C)	Temp. Ambiente (° C)
25	40.75	26.52
30	44.62	27.93
35	46.48	26.16
40	54.58	29.96
45	56.11	29.63
50	58.97	29.5
55	62.39	26.59
60	62.92	24.82

Tabla 2.5: Valores experimentales reales para las temperaturas de 25 a 60 W.

Una vez alcanzado el punto de saturación de temperatura en la luminaria HP-LED, se continúa con el proceso de enfriamiento apagando la fuente de alimentación de la luminaria. Estas curvas de enfriamiento se observan en la Fig. 2.28, en las que se muestran como las temperaturas descienden desde un valor máximo a la temperatura ambiente de cada experimento.

Para el caso de la Fig. 2.23, la curva inicia en una temperatura ambiente de 26.16° C y la temperatura máxima de la curva de calentamiento es de 46.48° C en el minuto 50. A partir de esta temperatura comienza la fase de enfriamiento apagando la fuente de alimentación de la luminaria, y, la curva de enfriamiento en el mismo período de tiempo se estabiliza a una temperatura ambiente de 25.49° C.

2.6.2. Cálculo de error: numérico vs. experimental

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos mediante el modelado numérico a través de SOLIDWORKS® y los obtenidos experimentalmente, se procederá a realizar el cálculo del error relativo en el proceso de calentamiento/enfriamiento, mediante la siguiente ecuación:

$$Error = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(T_{exp}(t_i) - T_{sim}(t_i))^2}{T_{exp}(t_i)^2}} * 100 \quad (2.13)$$

donde T_{exp} corresponde a la *temperatura experimental* y T_{sim} , la *temperatura simulada*.

En la Tabla 2.6 se muestran los porcentajes de error para cada una de las diferentes potencias utilizadas en este trabajo. Observamos que los porcentajes de error

son pequeños, por debajo del 10 %. La potencia que muestra el error más pequeño es a 35 W, con un error de 2.92 %.

Potencia (W)	Error (%)
25	0.67
30	0.81
35	0.45
40	1.36
45	1.02
50	0.56
55	1.02
60	0.84

Tabla 2.6: Porcentajes de error en mediciones numéricas vs experimentales.

En la Fig. 2.29 podemos observar las curvas de calentamiento numérico y experimental, a esta potencia de 35 W; la similitud entre ambas curvas es evidente, así como sus valores máximos de temperatura, 46.48°C y 47.1°C , numérico y experimental, respectivamente, ambas con una temperatura ambiente inicial de 23°C .

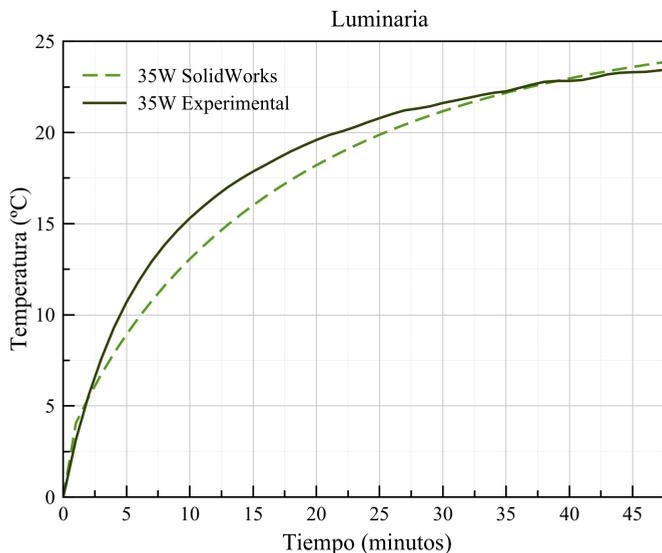


Figura 2.29: Comparación de curvas de calentamiento numérico/experimental a 35 W.

2.6.3. Análisis de sensibilidad: método Monte Carlo

El objetivo de un análisis de sensibilidad en este capítulo es estudiar la respuesta del modelo numérico simulado en SOLIDWORKS® con respecto a la variación de los parámetros de diseño específicos, como la constante de convección, h , y el coeficiente de radiación o emisividad, ξ . Este análisis de sensibilidad tiene como propósito establecer cuál de estos dos parámetros tiene un mayor impacto en la respuesta de la temperatura del chip LED. El método Monte Carlo basado en muestreo es una técnica que opera un modelo varias veces con muestras aleatorias generadas a partir de distribuciones de entrada, proporciona soluciones aproximadas a los análisis de incertidumbre y sensibilidad mediante la realización de experimentos de modelo estadístico [57, 58]. El método puede manejar modelos de caja negra complejos, independientemente de la linealidad y la continuidad, y generar una distribución de probabilidad para cada salida dependiendo de los tipos de distribución de entrada [59, 60].

Determinar las distribuciones de probabilidad de los parámetros de entrada son el primer paso en el análisis de sensibilidad. Utilizar una distribución normal o distribución Gaussiana es una alternativa interesante en este tipo de análisis, ya que este tipo de distribución es una de las más utilizada en los textos de estadística y, además, con frecuencia distintas variables asociadas a fenómenos naturales y cotidianos siguen este comportamiento. La distribución normal está determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente como μ y σ . Para este caso en particular, se han generado 100 sucesos aleatoriamente bajo una distribución Gaussiana para los parámetros de convección y radiación, h y ξ , respectivamente. Para el caso de la convección h , con $\mu = 5.25$ y una variación de $\sigma = 0.2625$; y para el caso de la radiación, ξ , $\mu = 0.06$ y $\sigma = 0.003$, en ambos casos se varió σ un 5%; en la Fig. 2.30, se muestra la generación de sucesos de ambos casos, h y ξ , con sus parámetros correspondientes en una distribución Gaussiana.

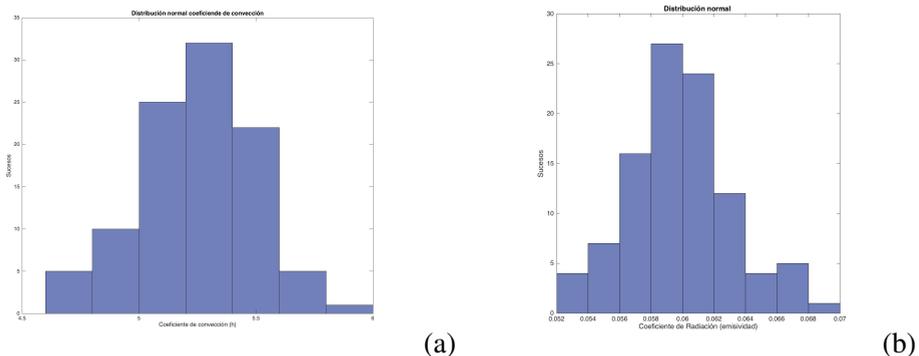


Figura 2.30: Distribución normal: a) convección y b) radiación.

La Fig. 2.31 muestra la relación entre el coeficiente de convección, h , y la temperatura en la simulación numérica de la luminaria HP-LED. Podemos observar que para un $\sigma = 0.2625$ se produce un variación en la temperatura desde 45.49° hasta 48.67° C.

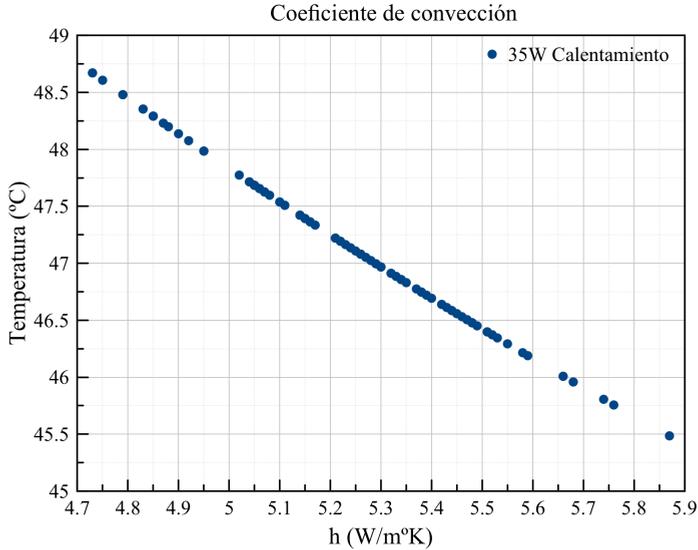


Figura 2.31: Coeficiente de convección, h .

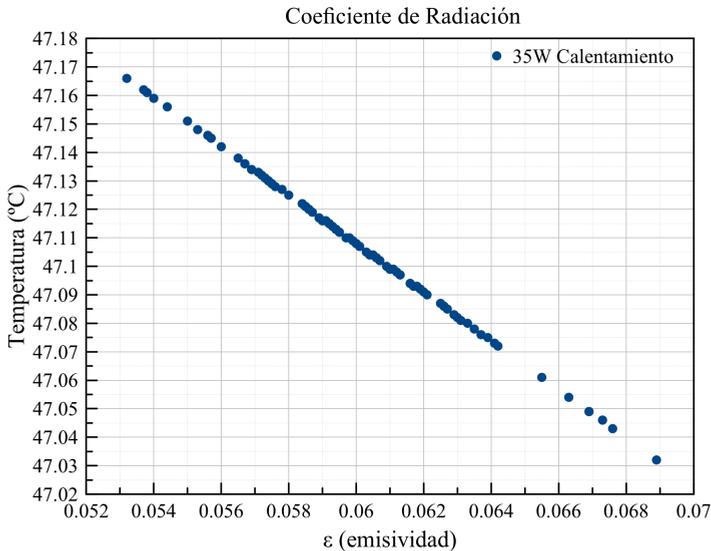


Figura 2.32: Coeficiente de radiación, ξ .

En el caso de la relación entre la radiación, ξ , y la temperatura en la simulación numérica de la luminaria HP-LED, Fig. 2.32, podemos observar que para un $\sigma = 0.003$ produce una variación en la temperatura desde 47.032° hasta 47.166° C.

Por lo tanto, podemos concluir en base a nuestro análisis de sensibilidad mediante en el método de Monte Carlo que, para una distribución normal, los coeficientes de convección (h) y radiación (ξ) variando σ en un 5% para ambos parámetros, produce una mayor variación de temperatura en el coeficiente de convección (h) con un valor de 3.18° C, en comparación con un valor de 0.134° C para el coeficiente de radiación (ξ).

2.7. Discusiones y conclusiones

Hemos presentado un estudio numérico de la distribución de temperatura en estado estable de un diodo emisor de luz de alta potencia (HP-LED) realista. Nuestros resultados se han comparado con datos experimentales medidos en un prototipo fabricado bajo consideraciones de mercado. Se ha encontrado un buen acuerdo entre las simulaciones por computadora y las mediciones realizadas con un error por debajo del 3%. Por lo tanto, de nuestro análisis podemos deducir que los disipadores de calor pasivos de bajo costo de aluminio anodizado se pueden utilizar para mantener la temperatura de chips HP-LED de 25 - 60 W por debajo de 70° C, lo que hace posible alcanzar tiempos de vida de 55000 h con los ahorros correspondientes en el consumo de energía y mantenimiento. Por último, nuestro análisis de sensibilidad concluye que existe una mayor variación en la temperatura al cambiar el coeficiente de convección (h) que el coeficiente de radiación (ξ).

Capítulo 3

Gestión energética en edificios no residenciales utilizando técnicas de la industria 4.0 basadas en correlación estadística.

3.1. Resumen

A continuación, presentamos un análisis estadístico de las correlaciones entre la concentración de dióxido de carbono CO_2 y el consumo de energía en lugares de trabajo, con el objetivo de poder ser programado en plataformas energéticas en la nube, para la mejora de la gestión y el aumento del grado de automatización y control en la industria del sector servicios. Se pretende utilizar un sistema de bajo coste para medir y transmitir los datos de los edificios y la información puede ser analizada desde cualquier dispositivo remoto. El estudio incluye datos medidos durante un año en dos oficinas situadas en Sada (A Coruña, España) y Clayton (Panamá). Presentamos curvas de regresión lineal y no lineal, mostramos que hay correlaciones positivas significativas y discutimos aspectos estacionales y relacionados con el clima. Argumentamos que este tipo de análisis puede generar información útil para el diseño y operación en la industria de servicios, a través de plataformas energéticas de control y automatización en Web.

3.2. Introducción

La actividad humana es la principal responsable del consumo de energía en los edificios, que, a su vez, representa una fracción importante del gasto energético mundial y es un factor importante para el impacto ambiental [61,62]. Por otro lado, la actividad humana se puede controlar a través de los niveles de concentración de dióxido de carbono CO_2 del ambiente interior [63–65]. El seguimiento de la ocupación y la evaluación de su efecto sobre las principales variables ambiente de interior es un paso esencial para hacer predicciones precisas de la demanda de energía de los edificios [66,67]. Además, controlar la cantidad de CO_2 es importante ya que, incluso a concentraciones moderadas, puede producir incomodidad, afectar la salud de los ocupantes o reducir la eficiencia de los trabajadores, entre otros efectos [68]. Dado que las variables energéticas y ambientales son cruciales y están interrelacionadas, es interesante estudiarlas en combinación, con el objetivo final de proporcionar los datos que puedan respaldar una toma de decisiones inteligentes [69,70].

Los estándares internacionales más importantes como los de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) o la Organización Internacional de Normalización (ISO), y organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental en EE. UU. o la Comisión Europea imponen el uso de sensores de CO_2 como indicadores de la calidad de aire [71]. Por tanto, el acceso a los datos de concentración de CO_2 será masivo y muy asequible en el futuro cercano.

En este contexto, se han desarrollado muchos enfoques matemáticos y computacionales diferentes para comprender los datos ambientales de interiores y hacer uso de ellos para mejorar el rendimiento de los edificios. Incluyen, solo por mencionar algunos ejemplos, modelos simplificados en términos de ecuaciones diferenciales [72], análisis de *Big Data* [73], algoritmos de optimización [74] y métodos estadísticos [75]. El proceso de detección, modelado y actuación es fundamental para la eficiencia energética y constituye un tema de gran interés para una creciente comunidad de matemáticos, científicos e ingenieros. Debe allanar el camino para los sistemas de seguimiento del consumo con la precisión suficiente para hacer comparaciones entre las diferentes estrategias de ahorro, tanto a nivel de decisión pública como privada [76,77].

En el presente capítulo, se propone estudiar la relación entre dos variables clave del rendimiento del edificio: el consumo de energía y la concentración de CO_2 , cuyas correlaciones no han sido consideradas en la literatura. Lo hacemos analizando y comparando dos lugares de trabajo ubicados en diferentes continentes.

La adquisición de datos se realizó en condiciones reales con un sistema simple y económico para medir, transmitir y gestionar la información. Los estudios de caso sobre los aspectos ambientales y energéticos pueden proporcionar información importante en el estudio de la sostenibilidad del edificio; véase, por ejemplo [78]. La mejora de la gestión de la energía en la industria de servicios implica un conocimiento profundo de la actividad humana, que se refleja en el CO_2 y el consumo energético de las instalaciones utilizadas por los ocupantes. Por lo tanto, la determinación matemática de la relación entre los dos facilitará en gran medida la programación de algoritmos en las plataformas de gestión de energía que están comenzando a implementarse en la industria del sector de servicios para su automatización y control.

Dado que tanto el consumo de energía como la concentración de CO_2 están relacionados con la ocupación y la actividad humana, nuestra hipótesis principal es que deben existir correlaciones positivas significativas entre ellas. Sin embargo, el problema no es tan obvio. Por ejemplo, una ventilación fuerte puede resultar en niveles reducidos de CO_2 mientras que aumenta el gasto de energía y la tasa de ventilación tiene un fuerte impacto estacional en muchos edificios. Por otro lado, las personas emiten diferentes cantidades de CO_2 , dependiendo de sus tasas metabólicas, que pueden verse afectadas por la estación y la ropa. Además, pueden haber cargas eléctricas que no dependen de la presencia de personas, lo que limita de nuevo la cantidad de correlación. Por lo tanto, se puede esperar que la asociación entre el uso de energía de un ocupante y la tasa de emisión de CO_2 tenga una cantidad notable de dispersión, lo que resultaría en una reducción de los coeficientes de correlación.

La comparación de dos cantidades fácilmente medibles, como el consumo de energía y la concentración de CO_2 , puede ser útil para comprender el rendimiento de una instalación y la actividad humana en su interior. Para extraer conclusiones, es necesario hacer un análisis comparativo de diferentes conjuntos de datos y este trabajo pretende dar un paso en esta dirección. Postulamos que contrastar los resultados de diferentes industrias o partes de ellas, o para la operación del mismo edificio bajo diferentes condiciones climáticas puede proporcionar información valiosa, pruebas de eficiencia y, a medio plazo, indicadores útiles para la toma de decisiones. Las plataformas de gestión energética digital en la nube serán fundamentales para este propósito, en el contexto del rápido desarrollo de industria 4.0.

3.3. Marco teórico

3.3.1. Actividad humana

El intercambio de energía con el exterior está controlado por tres factores: el metabolismo, que supone ganancias por la ingestión de alimentos y su combustión; el intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente que le rodea, por conducción, convección y radiación y las pérdidas por evaporación del agua de los pulmones o de la piel (sudoración), Fig. 3.1 [79]. La energía producida por el metabolismo está directamente relacionada con la actividad desarrollada, ya que el proceso metabólico produce un exceso de energía al realizar un determinado trabajo. El exceso se transforma en calor, denominado *calor metabólico*. En reposo absoluto el gasto de energía es el mínimo necesario para mantener las funciones vegetativas y se denomina *metabolismo basal*. La energía consumida durante alguna actividad física es el componente más variable del consumo total de energía.

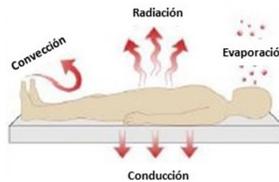


Figura 3.1: Intercambio de energía del cuerpo humano.

La normativa internacional ISO 7730 establece valores para distintos tipos de actividad humana los cuales incluyen desde una persona que se encuentra en reposo tendido hasta personas realizando algún tipo de ejercicio físico. El factor metabólico representa el calor producido dependiendo del nivel de actividad, su unidad es el *met* ($1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$) [80], Tabla 3.1.

Actividad	Tasa metabólica	
	W/m^2	met
Reposo, tendido	46	0.8
Reposo, sentado	58	1.0
Actividad sedentaria (oficina, domicilio, escuela, laboratorio)	70	1.2
Actividad ligera, de pie (de compras, laboratorio, industria ligera)	93	1.6
Actividad media, de pie (dependiente de comercio, tareas domésticas, trabajo con máquinas)	116	2.0
Caminar en llano:		
2 km/h	110	1.9
3 km/h	140	2.4
4 km/h	165	2.8
5 km/h	200	3.4

Tabla 3.1: Valor de la tasa metabólica respecto a la actividad que se desarrolla.

3.3.2. Dióxido de carbono, CO_2

El dióxido de carbono, CO_2 , es un gas incoloro y vital para la vida en este planeta [81, 82]. Este compuesto químico se encuentra en la naturaleza y está compuesto por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno; fue uno de los primeros gases en ser descritos como una sustancia distinta del aire en el siglo XVII, el químico *Jan Baptist van Helmont* observó que, cuando se quema carbón en un recipiente cerrado, la masa resultante de la ceniza era mucho menor que la del carbón original [83], esto lo interpretó como que el carbón fue transformado en una sustancia visible que él llamo *gas*. Pero las propiedades del CO_2 fueron estudiadas a mayor profundidad por *Joseph Black* en 1750 [84]. La concentración del CO_2 en la Tierra es de aproximadamente 0.04 %, 400 ppm (partes por millón), en volumen y este puede ser producido por fuentes naturales como volcanes, aguas termales, géiseres; es soluble en agua, ocurre de forma natural en aguas subterráneas, ríos, lagos, campos de hielo, glaciares y mares; está presente en yacimientos de gas natural y petróleo Fig. 3.2. Es resultado de la respiración de todos los organismos aeróbicos. Regresa a las aguas por medio de las branquias de los peces y al aire mediante los pulmones de los animales terrestres respiradores, incluidos los humanos. Se produce también durante los procesos de descomposición de materiales orgánicos; también se produce por la combustión de madera, carbohidratos y combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural [85–87].



Figura 3.2: Ciclo del dióxido de carbono, CO_2 , [87].

El CO_2 es un gas de efecto invernadero muy importante, ya que absorbe y emite radiación infrarroja en sus dos frecuencias de vibración activas en infrarrojos. Este proceso hace que el CO_2 caliente la superficie y la atmósfera inferior y enfríe la atmósfera superior. Un grupo de climatólogos coincidió que el aumento de la concentración atmosférica de CO_2 , y por lo tanto en el efecto invernadero inducido por el mismo, es la principal razón del aumento de la temperatura media global desde mediados del siglo XX. Aunque el principal gas de efecto invernadero responsable por el calentamiento es el CO_2 , también contribuyen el metano, el óxido nitroso, el ozono, y otros gases de efecto invernadero de larga vida. El CO_2 es el más alarmante, ya que ejerce una mayor influencia de calentamiento total que todos los otros gases combinados y porque tiene una mayor vida en la atmósfera [88].

3.3.3. Propiedades de gases y vapores peligrosos

Los gases y los vapores inflamables y tóxicos pueden producirse en muchos sitios. Para tratar el riesgo tóxico y el peligro de explosión sirven los sistemas de detección de gases [82]. A un estado de la materia con una temperatura superior a su punto de ebullición se le denomina **gas**. En condiciones normales 1 cm^3 de gas contiene unas 30×10^{18} moléculas, la distancia media entre ellas es solamente 3 nm. Chocan un billón de veces por segundo con otras moléculas, de tal manera que con cada colisión cambian su dirección de movimiento y transfieren energía a su compañero de colisión. Esto es un movimiento completamente aleatorio de moléculas, que es macroscópicamente medible como la temperatura del gas (energía cinética media de todas las moléculas) y la presión del gas (relacionado con la velocidad de las moléculas que golpean una superficie) o extensión (volumen) [89, 90]. Por lo que las variables de presión, temperatura y volumen están matemáticamente relacionadas mediante la *ley de los gases ideales* [90, 91]:

- A una presión constante, el volumen del gas cambia proporcionalmente a su temperatura; por ejemplo, se expande al ser calentado.
- A un volumen constante (gas en un recipiente cerrado) la presión del gas cambia proporcionalmente a su temperatura; por ejemplo, la presión interna de un recipiente cerrado aumenta cuando se calienta.
- A una temperatura constante, la presión cambia proporcionalmente a su volumen; por ejemplo, la presión aumenta cuando se comprime el gas.

Así mismo, el movimiento aleatorio extremadamente rápido de las moléculas de un gas es la razón de que los gases se mezclen fácilmente y nunca se separen uno del otro. El movimiento de las moléculas en la dirección de baja concentración (llamada

difusión) está basado en estas características moleculares y juega un papel esencial en los principios de medición de los sensores de gas.

3.3.4. Sistemas de detección de gases.

Los sistemas de detección de gases están dedicados a detectar concentraciones peligrosas de gas, para activar alarmas y, hasta donde sea posible, activar contramedidas antes de que se pueda producir una situación peligrosa para empleados, instalaciones y medioambiente [82–84, 92].

Los equipos para detección de gases pueden ser portátiles (o semi-portátiles) o sistemas fijos; la seguridad de una zona potencialmente afectada por gases y vapores peligrosos depende principalmente de la fiabilidad del sistema de detección de gases y, especialmente, de la calidad de los sensores utilizados. Los sensores fijos, incluyendo su electrónica, están en funcionamiento continuamente, año tras año, 24 horas al día, solo para estar disponibles para el instante aleatorio de un nivel máximo del gas, incluso en condiciones ambientales extremas, como por ejemplo a -50°C o $+65^{\circ}\text{C}$, a humedad relativa del aire alta o incluso muy seca, en aplicaciones al aire libre con lluvia, tormenta y nieve, condiciones desérticas, influencias electromagnéticas o fuertes vibraciones.

Los sensores son dispositivos que recogen información del mundo real y la entregan al sistema de control de forma que lo entienda, pueda procesar y tomar decisiones. El sensor recibe los cambios de la magnitud en cuestión, como temperatura, posición, fuerza, nivel, etc., y convierte estas mediciones en señales generalmente eléctricas para suministrar la información a instrumentos de lectura y registro o para un sistema de control que realizará acciones en función de las magnitudes medidas, Fig.3.3. Estos dispositivos se instalarán en el lugar apropiado para medir la magnitud y es necesario conocer su modo de operación para poder instalar, configurar o mantener sistemas que los incorporen [93, 94].

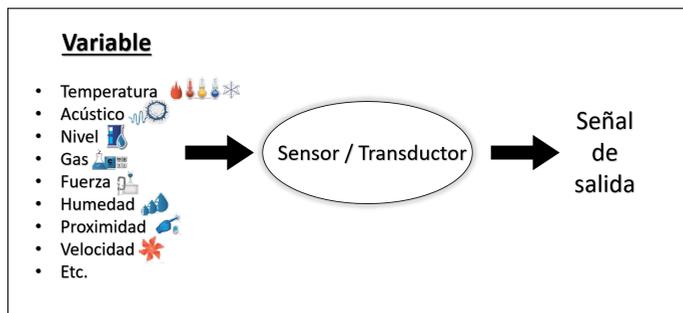


Figura 3.3: Esquema de un sensor.

Existe una gran cantidad de sensores para medidas de todo tipo y, por tanto, se pueden clasificar de muchas formas distintas, por ejemplo, según el *tipo de salida* que proporcionen [93–95]:

- **Analógicos:** entregan una salida de nivel variable en función del parámetro que midan; por ejemplo, un sensor de temperatura de -20°C a $+50^{\circ}\text{C}$ con salida $0 - 10\text{ V}$.
- **Binarios:** entregan un nivel *todo* o *nada* (1/0); por ejemplo, el estado de una puerta (abierta/cerrada).
- **Digitales:** entregan la información relativa a la medida con un protocolo de comunicaciones específico que el fabricante facilita; por ejemplo, el sensor de temperatura y humedad *STH - 11*.

También se pueden clasificar dependiendo de su *estructura interna*:

- **Pasivos:** no precisan de alimentación.
- **Activos:** tienen circuitos electrónicos que alimentar y necesitan de una fuente de energía.

Según el *tipo de parámetros* que son capaces de detectar entre ellos:

- **Mecánicos:** detectan parámetros relacionados con acciones mecánicas, contactos, aceleración, presión, etc.
- **Ambientales:** medidas de temperatura, humedad, pluviometría, velocidad del viento, etc.
- **Químicos:** niveles de dióxido de carbono (CO_2), niveles de oxígeno, contaminación del aire, azúcar en la sangre, etc.
- **Desplazamiento:** resistivos, inductivos y capacitivos, ópticos y basados en el *Efecto Hall*, etc.
- **Temperatura:** resistivos (metálicos y termistores), termoelectrónicos o termopares, basados en dispositivos integrados, etc.
- **Velocidad y aceleración:** acelerómetros inductivos, piezoeléctricos.

Para definir el funcionamiento de un sensor se deben tomar en cuenta diferentes características como, por ejemplo: exactitud, precisión, velocidad de respuesta y calibración, entre otros, los cuales vienen especificados por el fabricante.

3.3.5. Sensores de CO_2 en interiores.

Los edificios modernos también disponen hoy en día de un aislamiento térmico muy bueno debido a los requisitos legales, con el propósito de reducir al máximo los costes de calefacción, por lo tanto, las ventanas, paredes exteriores y cubiertas, incluido el revestimiento completo del edificio, están bien aislados por lo que la renovación de aire es mínima. La consecuencia de ello es, además de una elevada concentración de CO_2 , elevada humedad que provoca rápidamente la formación de moho en el edificio, por tanto, es previsible que se produzcan riesgos para la salud debido a esporas de hongos y similares. Para evitar de forma permanente los riesgos para la salud y los daños constructivos es indispensable disponer de un suministro de aire fresco según la demanda, por tal motivo es necesario la instalación de sensores de CO_2 . En caso de superar los valores definidos por las normativas, los sensores de CO_2 envían una señal al sistema de ventilación aumentando el suministro de aire nuevo o abren una ventana de forma automática.

En combinación con la moderna gestión técnica de edificios, los sensores de CO_2 contribuyen excesivamente a ahorrar energía. Sin un sensor de CO_2 , ventilamos según nuestras sensaciones, y normalmente, solemos hacerlo muy tarde o en exceso. Una ventilación excesiva significa que con el aire ambiente renovado se pierde calor y los costes de calefacción aumentan. Algunos sensores de CO_2 se caracterizan por el hecho de que indican cuándo y durante cuánto tiempo debe ventilarse. El sistema de ventilación suministra el aire fresco que realmente se necesita. Además de la energía calorífica que se ahorra, la regulación de la velocidad de la ventilación permite también un enorme potencial de ahorro en los sistemas de ventilación mediante el uso de un sensor de CO_2 .

Los sensores de CO_2 miden la concentración por Espectroscopia Infrarroja (Espectroscopia IR), también llamada *sistema de medición por infrarrojo no dispersivo (NDIR, Non Dispersive Infrared Detector)*. Puesto que el CO_2 atenúa la incidencia de la luz infrarroja en el sensor, la señal recibida varía en función de la concentración de CO_2 en el ambiente [90].

3.3.6. Sensores IR: principio de medición.

Los sensores para la detección de gases y vapores son transductores que usan ciertas propiedades de los gases para la conversión en una señal eléctrica adecuada. Especialmente tres principios de medición se han hecho dominantes en las décadas recientes de la detección industrial de gases: sensores electro-químicos, sensores de perla catalítica y sensores IR [90, 92, 93].

En el amplio campo de gases y vapores inflamables, la mayoría son compuestos químicos que principalmente contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y a veces, nitrógeno. Todos los gases absorben radiación de una manera característica, algunos incluso en el rango visible (0.4 a 0.8 μm), Fig. 3.4.

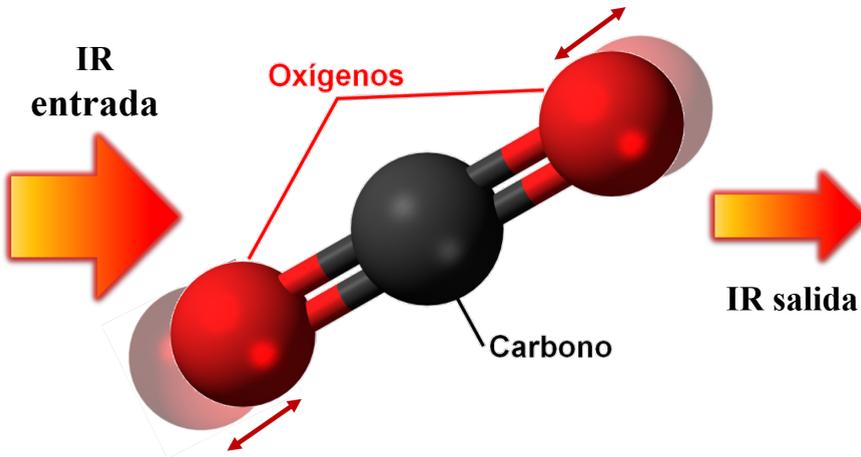


Figura 3.4: Molécula de CO_2 excitada.

Un sistema óptico que contenga una mezcla de, por ejemplo, metano o propano en el aire atenuará una intensidad de infrarrojo entrante de una manera predecible y, para un gas dado, esta atenuación depende solamente de su concentración. Este es el principio del fotómetro y es la base de un equipo de medición por infrarrojos. La correlación de reducción de intensidad medida por un lado y la concentración de gas en el sistema óptico por otro, se realiza en el proceso de calibración. La mayoría de los gases y vapores inflamables son hidrocarburos que casi siempre son detectables por sus características de absorción de infrarrojos.

La fuente de radiación de un sensor por infrarrojo es una lámpara de filamentos parpadeante, activada con bajo voltaje, teniendo un alto porcentaje de infrarrojos. Atravesando una ventana de IR transparente esta radiación se divide en dos partes mediante un divisor de rayos, una parte para el detector de medida, otra parte para el detector de referencia. Un detector consiste en un cristal piroeléctrico encapsulado que convierte la energía de la radiación recibida en un voltaje medible. Sin embargo, los detectores son diferentes debido a sus filtros de interferencia óptica: el cristal del detector de medida solo recibe, por ejemplo, radiación de 3.4 μm y el detector de referencia de, por ejemplo, 4.0 μm de longitud de onda. Los gases generalmente no absorben a 4.0 μm . Así ambos detectores miden una energía de radiación reducida, Fig. 3.5.

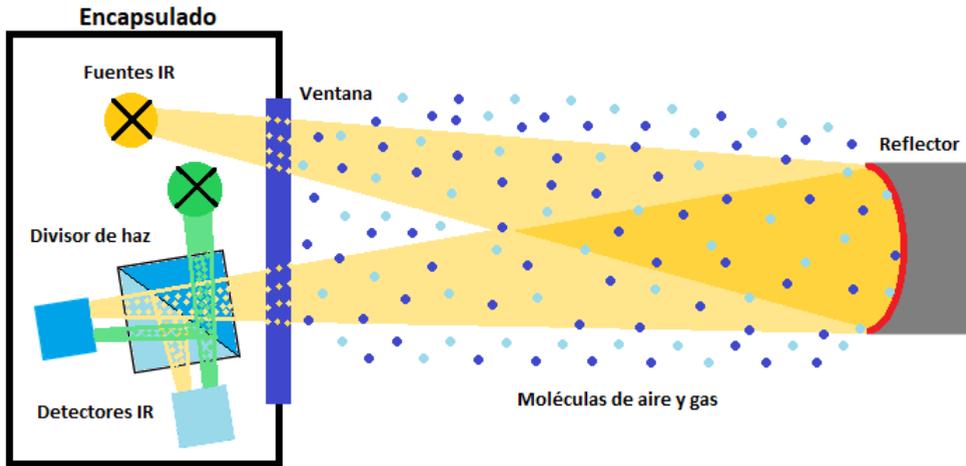


Figura 3.5: Esquema de un sensor IR [90].

Debido a su larga vida, los transmisores IR son preferidos en la medición industrial. Al contrario de los sensores electroquímicos de perla catalítica, los detectores de sensores IR no entran en contacto con los gases a detectar [90].

3.3.7. Elevada concentración de CO_2

Viviendas mal ventiladas, aulas sofocantes y salas de conferencias con el aire viciado se deben principalmente al dióxido de carbono espirado, también influye la humedad y la temperatura. El CO_2 es un gas de olor y de sabor neutro que solo es perceptible para las personas por sus propiedades negativas: malestar, disminución de concentración y descenso del rendimiento. El hombre toma oxígeno del aire al inspirar y expulsa al aire CO_2 al espirar. El aire inspirado contiene un 21 % vol. de oxígeno y un 0.035 % vol. de CO_2 . En cambio, el aire espirado contiene solamente un 16 % vol. de oxígeno y un 4 % vol. de CO_2 . Aunque el CO_2 solo es tóxico para las personas a partir de una concentración del 2.5 % vol., el rendimiento, la concentración y la sensación de bienestar disminuyen a partir de una concentración del 0.08 % vol., 800 ppm de CO_2 .

Precisamente, en espacios interiores como aulas, oficinas o salas de conferencias, en los que suelen reunirse muchas personas y que solo se pueden ventilar de forma restringida, se registran valores de 5,000 a 6,000 ppm de CO_2 transcurridos tan solo unos minutos. La regulación de la ventilación utiliza los valores medidos como indicador para aumentar el suministro de aire fresco [90], en la Tabla 3.2 se observan los efectos que se producen y sus cantidades de CO_2 respectivas [96].

Concentración de CO_2 (aire)	Consideraciones
350-450 ppm	Concentración típica de CO_2 en la atmósfera con tendencia al alza debido a la actividad del hombre.
600-800 ppm	Nivel aceptable de concentración a largo plazo que no causa efectos secundarios.
1000 ppm	Nivel límite de concentración a largo plazo en espacios cerrados.
5000 ppm	Nivel aceptable en exposición de 8 horas.
6000-30000 ppm	Nivel aceptable de concentración en corta exposición.
3-8 %	Rango de concentración de CO_2 que produce cambios en los parámetros biofísicos.
10 %	Nivel de CO_2 , en el que aparecen síntomas de envenenamiento.
20 %	Nivel de concentración de CO_2 , en el que aparece el riesgo de amenaza de vida.

Tabla 3.2: Concentración de CO_2 (ppm) y sus efectos en las personas [96].

3.3.8. Ventilación para una calidad de aire interior aceptable.

Los estándares internacionales imponen el uso de sensores de CO_2 como indicadores de calidad de aire en interiores [92]. Este hecho implicará que en cualquier parte del mundo donde se encuentre un edificio, habrá sensores de CO_2 en su sistema de aire acondicionado y, por lo tanto, el acceso a los datos de la actividad humana será masivo y muy accesible en un futuro cercano.

En la norma *UNE100011* de 1991, *Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de los locales*, se proporciona el método de cálculo del caudal del aire de ventilación requerido basado en el control de la concentración de dióxido de carbono y una tabla en la que se indican los valores recomendados para diferentes espacios y actividad. Para la realización de cualquier trabajo se precisa energía. Esta energía resulta de los procesos metabólicos que tienen lugar en el organismo; durante los mismos, los alimentos (fuente de carbono e hidrógeno) son oxidados dando como resultado, además de energía, CO_2 y agua que son eliminados por el organismo [97].

Se considera que la producción de CO_2 de una persona que está en situación de reposo absoluto (metabolismo basal=1 met) es de 0.0042 litros por segundo/met, y que el consumo de oxígeno y la producción de CO_2 dependen de la actividad física de las personas según las siguientes relaciones:

$$G_{CO_2} = 0.0042 \cdot AM \quad (3.1)$$

donde

G_{CO_2} es la producción de CO_2 en función de la actividad metabólica (l/s). AM representa la actividad metabólica medida en met ($58 W/m^2$; $90 kcal/h$).

El caudal de aire de ventilación (Q), expresado en litros por segundo y por persona, se obtiene mediante el siguiente balance de masas de CO_2 :

$$Q = \frac{G_{CO_2}}{G_{CO_2amb} - G_{CO_2ext}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

donde

G_{CO_2amb} representa la concentración máxima admisible de dióxido de carbono en el ambiente expresado en tanto por ciento en volumen. En la actualidad dicha concentración es de 1000 ppm (0.1 % en volumen).

G_{CO_2ext} representa la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y que es igual a 0.03 % en volumen. Sustituyendo los términos en la ecuación:

$$Q = \frac{0.0042 \cdot AM}{0.1 - 0.03} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Por ejemplo, a un nivel de actividad de 1.2 met, correspondientes a personas sedentarias, el caudal de ventilación necesario es de 7.2 l/s por persona (26 m³/h por persona) que se redondea a 7.5 l/s por persona y que es la base de la recomendación de la norma UNE para la ventilación de locales de oficinas [97].

Por lo tanto, el mantener una concentración de CO₂ en estado estable en un espacio no superior a 700 ppm por encima de los niveles de aire exterior indicará que una mayoría sustancial de visitantes que ingresen a un espacio estará satisfecha con respecto a los efluentes humanos (olor corporal).

Una calidad del aire realmente buena no supera el valor límite de 1000 ppm de CO₂, la norma DIN-1946 – 6 (Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemán de Normalización) [98], exige un caudal de aire exterior de 30 m³ por persona. Con los actuales estándares de construcción, y el elevado espesor de los revestimientos de los edificios, no es posible alcanzar un valor de CO₂ de 1000 ppm de CO₂ ventilando de vez en cuando o abriendo las ventanas. Con frecuencia, las ventanas de edificios públicos como escuelas, aulas u oficinas grandes no se pueden abrir, en estos casos, solamente es posible garantizar una buena calidad del aire con un sistema de ventilación controlado mediante un sensor de CO₂.

3.3.9. Consumo eléctrico

El incremento del consumo de energía en los sectores residenciales implica que el sistema eléctrico crezca a la par, tanto en infraestructura como en la potencia instalada, además los precios de la energía varían para poder satisfacer estas necesidades.

Asimismo, al optimizar el consumo energético se logra una menor emisión de CO_2 al medio ambiente al depender menos de centrales que utilizan combustibles fósiles, lo cual implica una reducción en la contaminación global, un tema que es de promordial importancia en la actualidad. El consumo de un edificio es muy complejo, ya que tiene variables como la ubicación geográfica, la arquitectura, los materiales usados para el diseño, la disposición de las ventanas, el número de ocupantes, el clima, la estación del año y los equipos instalados. Por tal motivo, es importante contar con plataformas de gestión energéticas que nos permitan conocer el consumo real de una edificación.

3.4. Material y métodos

3.4.1. Descripción de las instalaciones

Los sensores se colocaron en colaboración con una empresa privada española, Fridama Instalaciones, S. L., que diseña, calcula e instala aire acondicionado y sistemas eléctricos. La compañía tiene oficinas en varias áreas del mundo con diferentes condiciones climáticas, como España y Panamá, pero con programas de actividad y ocupación similares. Hacer el estudio en dos partes diferentes del mundo con legislaciones y climatologías diferentes pero con ocupación y actividad similares es útil para contrastar la metodología y los resultados.

El edificio de Fridama Instalaciones en Sada (España), consta de dos plantas; el almacén en la planta baja tiene una superficie de $250 m^2$. La planta superior comprende las oficinas técnicas y administrativas, donde trabajan 12 personas y ocupan un área de $200 m^2$. En la Fig.3.6 se presenta un esquema de la distribución de la sede de la compañía.

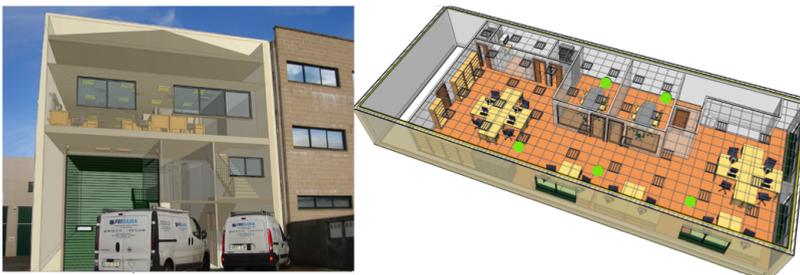


Figura 3.6: El edificio en España. Izquierda: vista de la parte externa del edificio con una simulación 3D superpuesta. Derecha: detalle de la posición de los sensores de CO_2 dentro de la oficina (puntos verdes).

El sistema de monitoreo, supervisión y control incluye cinco sensores de CO_2 ubicados siguiendo las pautas de ASHRAE 62.1 [71] en términos de zonas de respiración y la ubicación de las estaciones de trabajo, ver Fig.3.6. También hay divisiones de líneas eléctricas, diseñadas para que el consumo de las instalaciones sea independiente y para permitir el monitoreo por separado. Las cargas eléctricas principales son el equipo de aire acondicionado, que comprende un analizador y un dispositivo de control para que su funcionamiento se controle por temperatura de punto de ajuste y por programa de ocupación; un sistema de iluminación con una potencia instalada total de 5 kW ; y el sistema de automatización de oficinas con catorce computadoras, un servidor y tres impresoras (4 kW de potencia instalada).

Las oficinas centrales de Fridama Panamá en Clayton (Ciudad Panamá, República de Panamá) consiste en una sola planta de 111.2 m^2 que comprende el almacén, las oficinas técnicas y administrativas. Al igual que en España, los sensores de CO_2 se ubicaron en diferentes zonas de la planta. También se instalaron analizadores de red para monitorizar el consumo general de las instalaciones y los controladores regulan el funcionamiento de las instalaciones de acuerdo con la ocupación humana.

3.4.2. Métodos de adquisición de datos

El proceso automatizado de recopilación de datos se llevó a cabo utilizando los microcontroladores *ESP8266*, proporcionando visualización en tiempo real de los valores ambientales. El microcontrolador se utilizó con una tensión de funcionamiento en el rango de 3 a 3.6 V [99], siendo necesario colocar un regulador de voltaje (*D24V3F3*). El dispositivo utilizado para controlar el clima de la sala completa es el *AERASGARD® RFTM-LQ-CO2* controlado por microprocesador. Mide la concentración de CO_2 (por medio de tecnología *NDIR* [100]) en el rango de 0 a 5000 ppm, junto con la temperatura y la humedad relativa del aire. En la Fig.3.7 se presentan dos fotografías del sistema instalado.

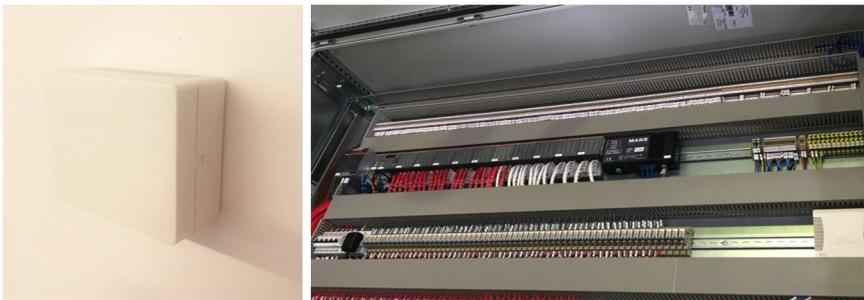


Figura 3.7: Dos fotografías de la instalación en la oficina de España. Izquierda: uno de los sensores colocado en la pared. Derecha: el panel de control.

El proceso de comunicación entre el microcontrolador y los sensores utiliza el protocolo I2C programado en LUA. Este lenguaje se usa porque es compacto, puede incorporarse a otras aplicaciones con facilidad y tiene administración de memoria automática [101]. Los datos se envían a través de Internet con el protocolo de Message Queue Telemetry Transport [MQTT] que es liviano y consume poco ancho de banda [102]. La arquitectura del MQTT sigue una topología en estrella, con un nodo central que actúa como servidor o intermediario, que en este caso es el software MOSQUITTO. La plataforma Web EQUUS [103] fue utilizada para supervisión, monitorización y control, permite el acceso a la información tanto en tiempo real como con datos históricos.

3.4.3. Métodos estadísticos

La siguiente sección presenta un análisis de los datos adquiridos que se basan en métodos estadísticos estándar; ver ejemplo [104]. En particular, utilizamos la regresión lineal estándar, que incluye el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson y el diagnóstico del modelo basado en el análisis de residuos. También recurrimos a métodos de regresión no lineal, en particular calculando el coeficiente de correlación de Spearman (una medida no paramétrica de la correlación de rangos entre dos variables que estima su posible relación usando una función monótona) y un estimador no paramétrico de Nadaraya-Watson para una función de regresión desconocida. Los cálculos se realizaron utilizando R, el conocido entorno de software libre para la informática estadística [105].

3.5. Resultados

En esta sección realizamos un análisis estadístico de un año de datos medidos en la oficina de Sada (1 de enero al 31 de diciembre de 2015) y en Clayton (14 de octubre de 2016 al 13 de octubre de 2017). Las mediciones de la concentración de CO_2 (ppm) y la potencia (P) que se consume (en kilovatios) se tomaron cada hora. Para el caso panameño, el análisis excluye el consumo de aire acondicionado: cuando se toma en cuenta el sistema de aire acondicionado, las correlaciones son mucho más débiles, presumiblemente porque sigue un patrón automático para su encendido y apagado. La Fig. 3.8 muestra la concentración de CO_2 (línea naranja) y el consumo de energía (P)(línea azul) donde se observan los días del 2 al 5 de enero, que incluyen días hábiles así como el primer fin de semana de enero de 2015; si observamos la Fig.3.8 las horas de los días que se muestran abarcan desde la hora 24 hasta la hora 120.

Las primeras 24 horas corresponden a un día típico de trabajo, las siguientes 48 horas corresponden a días no hábiles (sábado y domingo) en los que observamos claramente que al no haber personas, la cantidad de CO_2 es la mínima, 400 ppm, y por lo tanto, no hay consumo de energía.

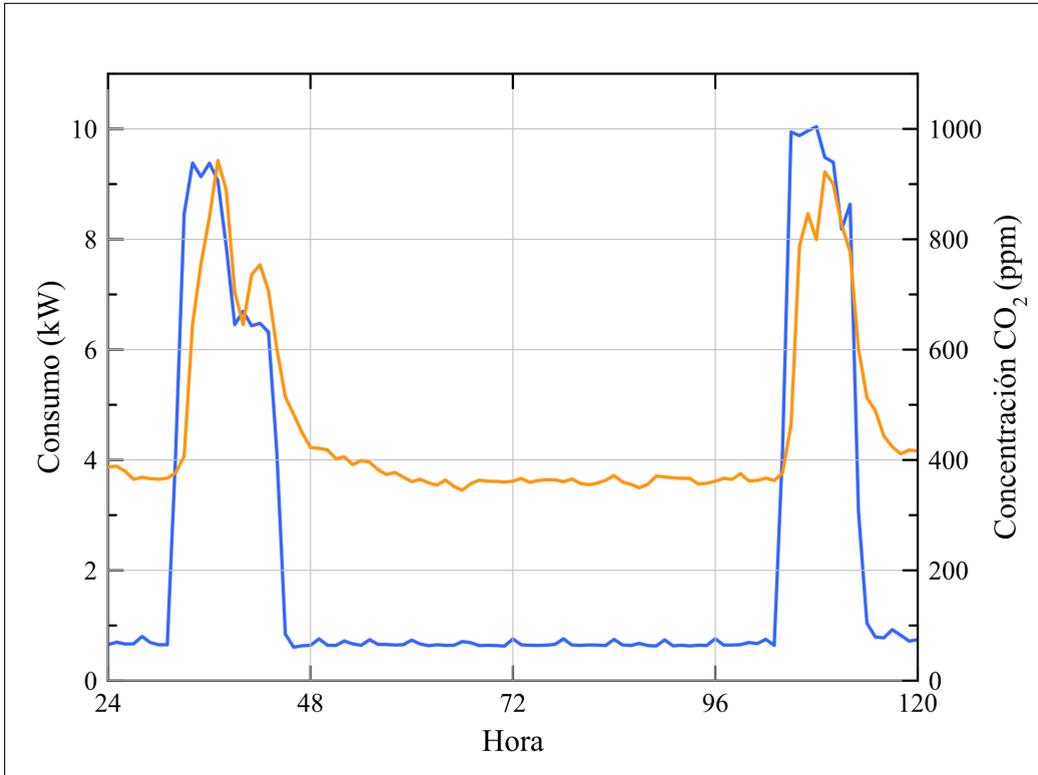


Figura 3.8: Consumo de potencia (P) y Concentración de CO_2 en los días del 2 al 5 de enero 2015 en el edificio de España.

La Fig.3.9 muestra más claramente cómo la concentración de CO_2 y P se comportan en días hábiles típicos. Se elevan rápidamente al comienzo de las horas de trabajo, oscilan de forma aparentemente aleatoria durante ese período y comienzan a disminuir después. Durante las horas sin ocupación, P se reduce a un valor aproximadamente constante por debajo de 1 kW y la concentración de CO_2 tiende al valor exterior. Es evidente que existe un cierto grado de correlación entre ambas cantidades. Durante los fines de semana y las vacaciones, ambas curvas permanecen prácticamente planas.

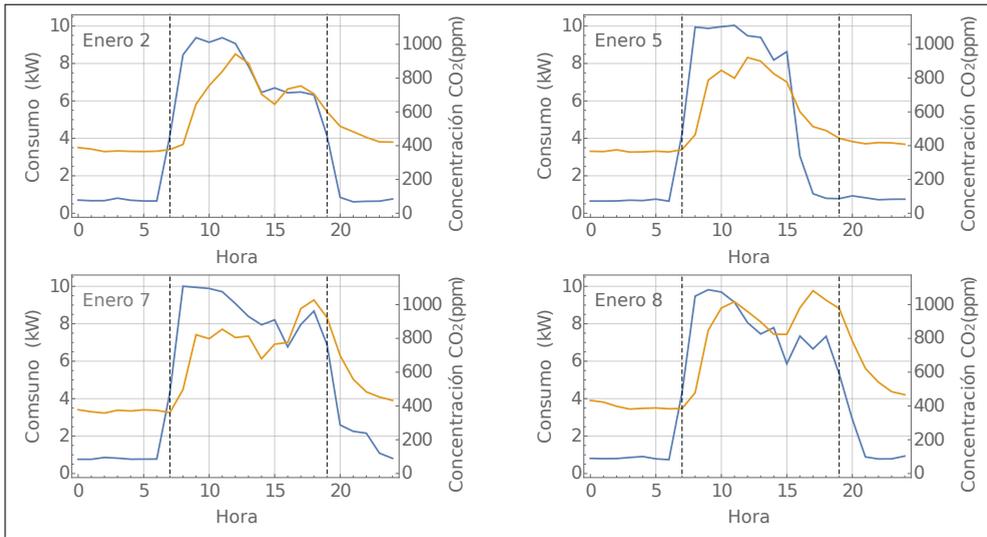


Figura 3.9: Evolución comparada en días hábiles típicos en Sada. Se muestra el consumo de energía (P) (línea azul) y la concentración de CO_2 (línea naranja). Las curvas para los datos medidos en Panamá son cualitativamente similares.

La Fig.3.10, representa gráficos de dispersión que representan todas las mediciones a lo largo del año. Una prueba de asociación entre muestras pareadas arroja valores p insignificantes en ambos casos, lo que demuestra que la concentración de P y CO_2 no son estadísticamente independientes. La posibilidad más simple es postular un modelo de regresión lineal:

$$CO_2(ppm) \approx (372 \pm 2) + (59.9 \pm 0.7)P(kW) \quad \text{oficina en España,} \quad (3.4)$$

$$CO_2(ppm) \approx (394 \pm 1) + (189 \pm 2)P(kW) \quad \text{oficina en Panamá,} \quad (3.5)$$

donde hemos indicado los mejores parámetros de ajuste y sus errores estándar. Los coeficientes de correlación de Pearson son $r = 0.72$ (España) y $r = 0.68$ (Panamá), lo que indica que existen correlaciones positivas significativas entre las variables. Vale la pena comentar sobre las correlaciones encontradas para subconjuntos particulares de datos. Por ejemplo, en el caso de España, cuando los fines de semana y las vacaciones (que en su mayoría contribuyen a la nube de puntos en la parte inferior izquierda de la Fig.3.10) se excluyen, encontramos un ligero cambio en el coeficiente de Pearson ($r = 0.67$). Esto se reduce un poco más cuando las horas nocturnas sin presencia humana también se excluyen, aunque una correlación considerable permanece $r = 0.53$.

Por otro lado, sí solo se tienen en cuenta las vacaciones y los fines de semana, tanto P como el CO_2 oscilan de forma aleatoria alrededor de sus valores mínimos y, como cabría esperar, su correlación es insignificante ($r = 0.04$).

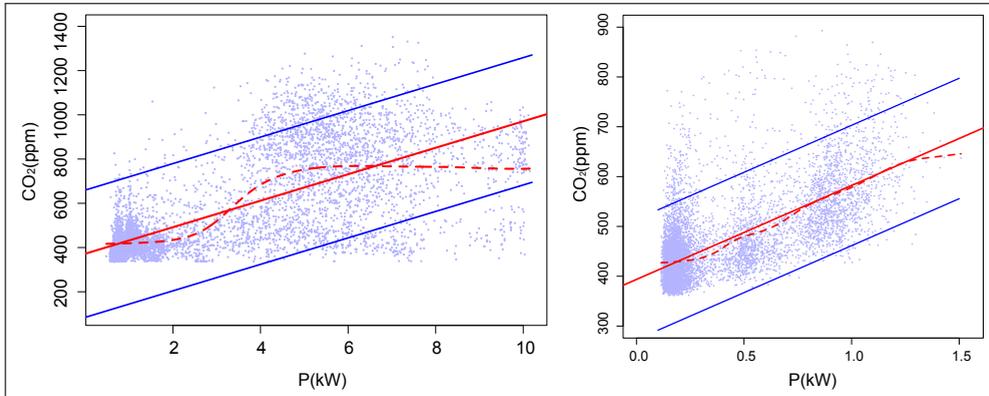


Figura 3.10: Diagramas de dispersión de las muestras de datos. Los puntos azules corresponden a las mediciones individuales. La línea continua roja es la que mejor se ajusta al modelo de regresión lineal y las líneas continuas azules marcan sus intervalos de predicción con un nivel de confianza del 95 %. La línea roja discontinua es una regresión no paramétrica que utiliza un estimador Nadaraya-Watson.

El diagnóstico del modelado lineal se realiza analizando los residuos, es decir, las diferencias entre los valores observados de concentración de CO_2 y los predichos por las expresiones de mejor ajuste. Los paneles izquierdos de la Fig.3.11 presentan gráficos de dispersión de los residuos. Es evidente que los datos en realidad no cumplen la hipótesis de la homocedasticidad, la cual es una propiedad de algunos modelos de regresión lineal en los que los errores de estimación son constantes a lo largo de los cálculos. Para valores grandes de P , la mayoría de los residuos son negativos; indicando claramente que el ajuste lineal tiende a sobreestimar la concentración de CO_2 en esa región de parámetros (el efecto es más marcado para la oficina española). El histograma de residuos muestra que siguen, en ambos casos, una distribución acampanada (no gaussiana).

Por tanto, aún siendo el ajuste lineal una primera aproximación conveniente, los datos no cumplen completamente con la hipótesis típica de regresión lineal. Por esta razón, es interesante considerar también modelos más generales. Los coeficientes de Spearman, que suponen que las variaciones de las variables están relacionadas monótonamente, pero no necesariamente linealmente, son $r_S = 0.68$ (Sada) y $r_S = 0.59$ (Clayton). En la Fig.3.11 hemos incluido el resultado de un ajuste no paramétrico basado en un estimador de Nadaraya-Watson. En el caso español, una estimación es significativamente menor que la lineal para $P \geq 8$ kW.

Curiosamente, parece que la concentración promedio de CO_2 se aplana y no sigue creciendo para estos valores de P.

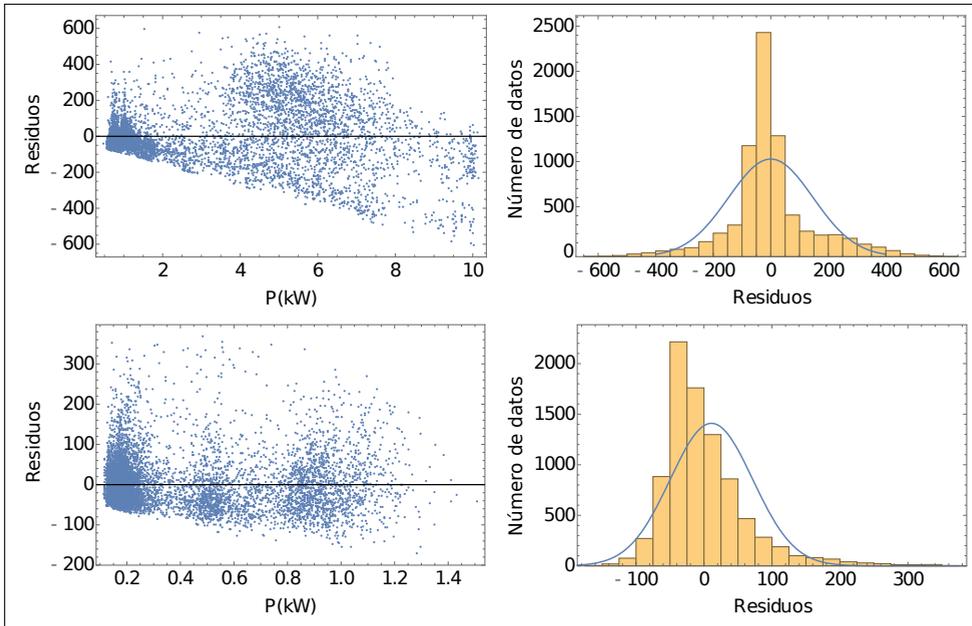


Figura 3.11: Diagnóstico del modelo de regresión lineal. Los paneles en la parte superior corresponden a la oficina española y los que están en la parte inferior a la oficina panameña. A la izquierda, trazamos los residuos como una función de la potencia. A la derecha, se muestra un histograma de los residuos y se compara con una distribución normal con la misma normalización y desviación estándar.

Otra cuestión interesante es si la relación entre P y la concentración de CO_2 varía a lo largo del año. Hemos repetido el análisis realizando separadamente el cálculo de regresión lineal para cada uno de los meses del año. Cualitativamente, trazados similares a los de las Figuras 3.9, 3.10, 3.11 se encuentran en todos los casos. En la Fig. 3.12, representamos los coeficientes de correlación, calculados por separado cada mes. Ambos coeficientes permanecen todos los casos no lejos de 0.7 y no se puede apreciar una variación estacional clara.

Algunos detalles varían de mes a mes. Por ejemplo, durante los meses fríos de Sada (enero, febrero, noviembre y diciembre), los ajustes lineales suelen sobreestimar la concentración de CO_2 al comienzo de la jornada laboral. Presumiblemente, la razón es que la calefacción se enciende repentinamente, aumentando la demanda de energía, pero lleva un tiempo después de la llegada de los trabajadores que los niveles de CO_2 crezcan. Esto se puede apreciar en la Fig. 3.9, donde por la mañana se puede ver que el aumento de P ocurre antes que el aumento en la concentración

de CO_2 . De hecho, si para los meses antes mencionados se eliminan de la muestra de datos correspondientes a las 07:00 y 08:00 durante los días hábiles, el valor de r crece, llegando a alcanzar 0.83 para el mes de enero.

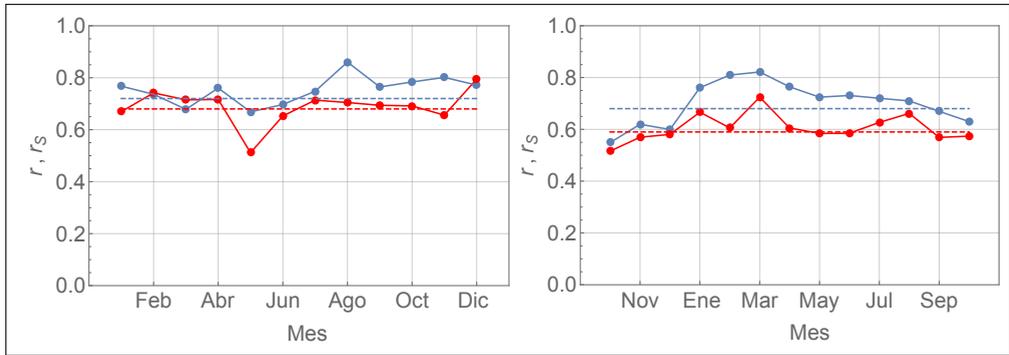


Figura 3.12: Los coeficientes de correlación de Pearson (azul) y Spearman (rojo), calculados para las muestras de datos de los doce meses del año para las oficinas en España (izquierda) y Panamá (derecha). Las líneas punteadas horizontales marcan sus valores cuando el cálculo se realiza introduciendo todos los datos anuales.

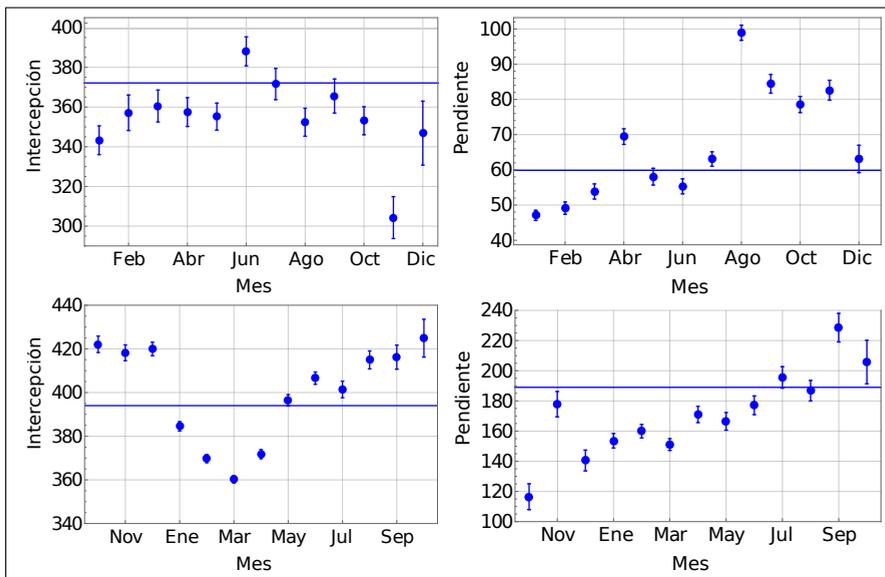


Figura 3.13: Coeficientes de los mejores ajustes lineales para cada mes. $CO_2(\text{ppm}) \approx (\text{Intercepción}) + (\text{Pendiente})P$. Las líneas horizontales marcan las de todo el año. Las barras de error representan los errores estándar de los parámetros que mejor se ajustan. Los paneles en la parte superior corresponden a la oficina española y los que están en la parte inferior a la oficina panameña.

La Fig.3.13 compara los coeficientes de los ajustes lineales de los datos para cada mes por separado. En España, la intercepción (ordenada en el origen), que está relacionado con la concentración de CO_2 al aire libre, permanece aproximadamente constante durante todo el año. El mes de noviembre es un caso atípico en este sentido, presumiblemente en relación con los problemas del sistema de adquisición de datos. Curiosamente, la pendiente es significativamente más alta para el período de agosto a noviembre, pero no hemos encontrado una explicación convincente para este hecho peculiar. En Panamá, la intercepción permanece aproximadamente constante durante un período del año, pero hay una disminución clara de enero a abril. Estos son precisamente los meses más ventosos en la Ciudad de Panamá, que implican una caída de la concentración de CO_2 al nivel del suelo. Por otro lado, vemos que la pendiente tiende a aumentar a medida que pasan los meses. Esto podría estar relacionado con la ocupación de la oficina, ya que una pendiente más grande significa que un cierto aumento en el gasto de energía da como resultado un mayor aumento en la concentración de CO_2 .

Finalmente, es interesante comparar los resultados descritos con otro tipo de locales, donde se pueden esperar resultados diferentes para la correlación entre el consumo de energía y la concentración de dióxido de carbono. Por ejemplo, muchas áreas comerciales funcionan con sistemas automatizados y los gastos apenas dependen de la cantidad de clientes. En la Fig.3.14, presentamos una comparación de una semana de datos para un área recreativa en Panamá. Si bien la curva del consumo de energía es similar todos los días, los picos de concentración de CO_2 son mucho más prominentes durante el fin de semana, especialmente los sábados.

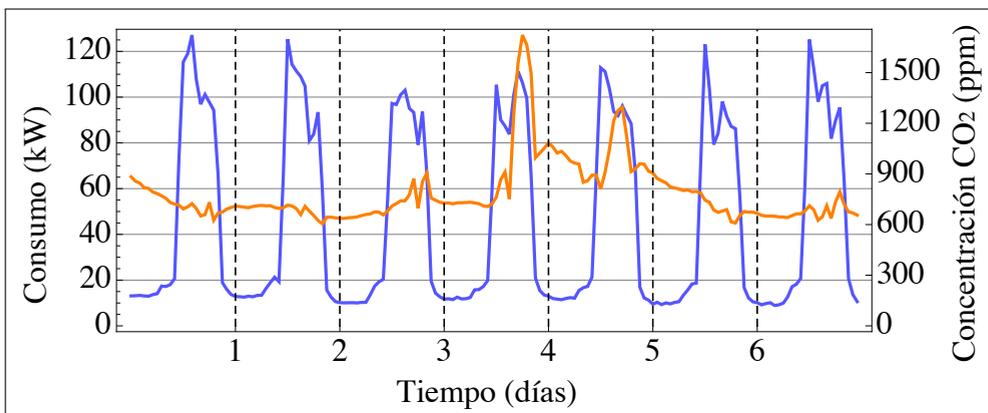


Figura 3.14: Evolución comparada durante una semana, de miércoles a martes, en un área recreativa en la ciudad de Panamá. Se muestra el consumo de energía (línea azul) y la concentración de CO_2 (línea naranja).

En el caso de la Fig. 3.14, el coeficiente de Pearson para el mes de datos que tenemos disponibles es $r = 0.26$. Se obtiene un resultado similar para una tienda en Alta Plaza Mall (Ciudad de Panamá), donde encontramos $r = 0.24$. En este último caso, también tenemos datos de ocupación humana y, por lo tanto, podemos incluirlos en el análisis. Como era de esperar, durante las horas con presencia humana, el número de ocupantes se correlaciona significativamente con la concentración de CO_2 ($r = 0.74$), pero solo se correlaciona débilmente con el consumo de energía ($r = 0.31$).

En resumen, los datos disponibles sugieren que el consumo de energía no automatizado en lugares de trabajo está significativamente relacionado de forma positiva con la concentración de CO_2 (alrededor de $r = 0.7$ en los casos analizados). Por otro lado, en locales con patrones de consumo automatizados, existe una correlación moderada (alrededor de $r = 0.25$ en los casos estudiados). La correlación es aún positiva porque el sistema automático normalmente gasta menos durante las horas no pico (por ejemplo, durante en la noche en la Fig. 3.14). Esta es la razón por la cual el sistema climático automatizado fue excluido del análisis de la oficina panameña en las Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13. De hecho, en ese caso, la correlación entre el gasto energético del sistema climático y la concentración de CO_2 es $r = 0.34$, similar al de las áreas comerciales discutidas en el párrafo anterior.

3.6. Conclusiones y discusiones

Hemos conjeturado que el gasto de energía y la concentración de CO_2 deberían presentar correlaciones positivas significativas para los lugares de trabajo. Esta relación implica que es interesante analizar el consumo de energía y las variables del ambiente interior en combinación. Ambas variables están relacionadas con la actividad humana, se pueden medir con sistemas relativamente simples y su estudio puede proporcionar un elemento para comprender el rendimiento de los edificios. Nuestras afirmaciones están respaldadas por unos pocos estudios de casos para los cuales tenemos datos disponibles. No está claro en este momento si son generalizables y, por lo tanto, las conclusiones deben tomarse con cautela. Sin embargo, creemos que los resultados son atractivos, ya que hemos demostrado que abren nuevas vías para la interpretación de datos que estarán cada vez más disponibles en la era de Internet de las Cosas y de la Industria 4.0.

Se instalaron sensores comerciales y se utilizó una plataforma en línea para la gestión de datos. Los dos casos discutidos aquí corresponden a dos lugares de trabajo con algunas similitudes, aunque difieren un tanto en tamaño, disposición y ocupación promedio. Además, están en diferentes continentes bajo condiciones cli-

máticas muy diferentes.

A pesar de las diferencias, hemos visto que hay algunas similitudes notables en la correlación entre el consumo de energía y la concentración de CO_2 . Un modelo de regresión lineal simple produce coeficientes de Pearson alrededor de $r = 0.7$ en ambos casos. El coeficiente de determinación, que equivale a la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de la variable independiente, viene dado por r^2 . Esto significa que alrededor del 50 % de la variación del gasto de energía considerado se puede explicar con los datos de concentración de CO_2 ; este resultado se cumple independientemente de sí los conjuntos de datos se agrupan mensualmente o anualmente, cf. Fig.3.13. Un análisis de los residuos proporciona el mismo resultado en ambos casos: los supuestos habituales de homocedasticidad y normalidad no se satisfacen totalmente. Esto motiva el estudio paralelo y la comparación de modelos de regresión no lineales y no paramétricos. Sin embargo, la aproximación lineal sigue siendo útil ya que proporciona datos cuantitativos simples. Por ejemplo, analizar cómo esos parámetros cambian con el tiempo produce información no trivial, cf. Fig.3.14, que muestra cómo la relación entre la concentración de CO_2 y P cambia debido a la variación estacional u otras causas indeterminadas. Por otro lado, hemos argumentado y comprobado que la correlación debería de ser más débil para otro tipo de locales tales como las áreas comerciales donde los gastos de energía son casi independientes del número de ocupantes.

Sería interesante analizar más espacios y edificios para confirmar o refutar las tendencias generales antes mencionadas. Para entender correctamente la variación estacional, sería necesario estudiar períodos más largos en el análisis, incluyendo varios años. Agregar otros tipos de sensores también sería útil. En particular, aunque no están tan extendidos como los utilizados aquí, los sensores de presencia serían valiosos. Las técnicas de análisis estadístico multivariante pueden producir ideas y resultados importantes, a costa de complicar el modelado con la introducción de más variables ambientales. Otra mejora posible del enfoque sería combinar el procedimiento estadístico con el modelado físico simple.

Actualmente, la tendencia es hacia un sector industrial y de servicios altamente automatizado, en el marco de la llamada industria 4.0. Esto implica un alto grado de sensorización y análisis de datos. En los edificios, esto es fundamental para la toma de decisiones hacia la sostenibilidad [106]. El presente estudio tiene como objetivo proporcionar sistemas de monitorización y control mediante el estudio de correlaciones entre variables, para reducir costes de inversión en este tipo de plataformas. Los resultados presentados para locales de oficinas durante un año, en diferentes continentes, con la misma actividad, diferentes climatologías y reglamentos técnicos, han dejado en claro que este camino es posible. El estudio sugiere que el consumo energético global puede predecirse parcialmente a través de sensores de CO_2 ,

a un coste aproximadamente cuatro veces menor, pero con la precisión necesaria en la automatización de la gestión y el mantenimiento de este tipo de instalaciones.

Más allá del alcance de esta contribución, el objetivo de este tipo de análisis es proporcionar ideas que puedan incorporarse en modelos de optimización más complejos, como los basados en redes neuronales artificiales [107] o algoritmos genéticos [108]. También prevemos que técnicas similares podrían aplicarse en otras situaciones como, por ejemplo, la gestión de la producción de calor y la refrigeración en procesos industriales [109]. Por tanto, esperamos que este estudio contribuya al desarrollo de vías de investigación que, en el futuro, conduzcan a estrategias para comprender y mejorar el rendimiento de edificios. Estas aplicaciones potenciales se basan en plataformas energéticas inteligentes en la nube, en el contexto de la industria 4.0.

Capítulo 4

Conclusiones generales

El elemento clave que caracteriza a la *Smart city* es la tecnología, que se aplica a una infraestructura típica del tejido urbano que incluye la iluminación y la aplicación de sensores de variables físicas localizados en puntos de acceso remoto colocados de forma estratégica y bajo normativas internacionales. En este trabajo de tesis hemos presentado distintos enfoques relacionados con la incursión de dos diferentes tecnologías como *Smart lighting* y la monitorización en tiempo real, a través de una plataforma de gestión energética, utilizando sensores de gases de efecto invernadero, todo ello orientado hacia la sustentabilidad de las ciudades, *Smart cities*.

En la primera parte de este trabajo, hemos realizado un análisis numérico de la distribución de temperatura en estado estable de un HP-LED. Los resultados obtenidos se han verificado con datos experimentales conseguidos a partir de un prototipo fabricado bajo estándares de mercado. Hemos alcanzado un error del 2.92 % entre las simulaciones realizadas por el software SOLIDWORKS® y las mediciones experimentales para una luminaria con una potencia de 35 W en su fase de calentamiento. Por lo tanto, de nuestro estudio podemos concluir que el disipador de calor pasivo diseñado e implementado, de bajo costo de aluminio anodizado, se puede utilizar para mantener la temperatura del chip HP-LED de 25 W - 60 W por debajo de 70° C, lo que hace posible alcanzar tiempos de vida de hasta 55000 h con los ahorros correspondientes en el consumo de energía y mantenimiento. Por último, en base al análisis de sensibilidad realizado con el método Monte Carlo, podemos concluir que la variación del coeficiente de convección (h) implica una mayor variación en la temperatura en comparación con el coeficiente de radiación (ξ). La actualización de los sistemas de iluminación LED es un caso aceptado en el sector público y privado. Muchas ciudades de todo el mundo han demostrado los beneficios de las redes y las tecnologías de gestión remota para la iluminación exterior (pública).

Además de reducir el costo total de la implementación, la actualización e instalación de un sistema de control simultáneo con iluminación LED permite crear una plataforma multiobjetivo desde la que se pueden implementar aplicaciones inteligentes en el futuro. Soluciones en los problemas de delincuencia, seguridad para peatones y conductores, monitoreo de la calidad de aire, estacionamiento inteligente, detección de disparos de armas, son sólo algunas de las funcionalidades que puede llegar a tener la aplicación de una red inteligente de iluminación pública. La mayoría de las ciudades buscarán dar el paso hacia la incorporación de redes diseñadas y orientadas para diferentes necesidades y aplicaciones (*Smart lighting*). Es por ello que las *Smart cities* consideran las instalaciones de dichas redes a medida que realizan innovaciones hacia un sistema de iluminación LED, aprovechando y minimizando así sus costos de instalación y maximizando su flexibilidad futura.

En la segunda parte del trabajo se demostró que, efectivamente, existe una correlación positiva entre el consumo eléctrico y la concentración de CO_2 en edificios no residenciales. Las variables mencionadas anteriormente están fuertemente relacionadas con la actividad humana, proporcionando un aspecto clave para entender el rendimiento de los edificios. Los datos se obtuvieron a partir de la instalación de sensores y mediante el uso de una plataforma de gestión energética. Es importante tener en cuenta que se estudiaron dos lugares de trabajo con algunas similitudes, pero con diferente volumen, distribución, ocupación y condiciones climáticas, sin pasar por alto que están ubicados en diferentes continentes, lo que hace más interesante este estudio. A pesar de estas diferencias, hemos observado que tanto el consumo de energía como la concentración de CO_2 tienen correlaciones similares que son relevantes. Un modelo de regresión lineal simple produce coeficientes de Pearson alrededor de $r = 0.7$ en ambos casos. El coeficiente de determinación viene dado por r^2 . Ello indica que aproximadamente el 50 % de la variación del consumo de energía considerado se puede explicar con los datos de concentración de CO_2 ; como se observa en la Fig.3.13, este resultado se cumple independientemente de si los conjuntos de datos se agrupan mensualmente o anualmente. En ambos casos, el análisis de los residuos arroja que: los supuestos habituales de homocedasticidad y normalidad no se satisfacen totalmente. Es importante tener en cuenta que estos parámetros, consumo energético y concentración de CO_2 , generan información no trivial, lo que se observa en la Fig.3.14, debido a la variación estacional u otras causas indeterminadas. Además, hemos verificado que la correlación debería ser más débil para otro tipo de locales tales como las áreas comerciales, donde los gastos de energía son casi independientes del número de ocupantes. Con el propósito de mejorar esta parte, sería interesante analizar más espacios y edificios para confirmar o refutar las tendencias generales antes mencionadas, entre ellas, la variación estacional, para la que sería necesario estudiar períodos más largos, incluyendo varios años. Además, sería útil añadir sensores de presencia.

Las técnicas de análisis estadístico multivariante pueden producir ideas y resultados importantes, a costa de complicar el modelado con la introducción de más variables ambientales. Actualmente, la tendencia es hacia un sector industrial y de servicios altamente automatizado, en el marco de la llamada industria 4.0. Esto implica un alto grado de sensorización y análisis de datos. En los edificios, esto es fundamental para la toma de decisiones hacia la sostenibilidad [106]. El presente estudio tiene como objetivo proporcionar sistemas de monitorización y control mediante el estudio de correlaciones entre variables, para reducir costes de inversión con este tipo de plataformas.

Por tanto, esperamos que estos estudios contribuyan al desarrollo de vías de investigación que, en un futuro muy cercano, conduzcan a estrategias para comprender y mejorar el rendimiento de ciudades inteligentes, basadas en las tecnologías descritas en este trabajo de tesis: *Smart lighting* y edificios sustentables. Estas aplicaciones potenciales se basan en plataformas energéticas inteligentes disponibles en la era del Internet de las Cosas (IoT) y la industria 4.0.

Bibliografía

- [1] Telehouse. www.telehouse.com/2017/06/disaster-recovery-solutions-essential-securing-backbone-smart-cities/t. 2018.
- [2] H. Longás. Tecnologías y aplicaciones de las smart cities para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Periódico: El País, November 2016.
- [3] R. Khatoun and S. Zeadally. Smart cities: concepts, architectures, research opportunities. *Communications of the ACM*, 59(8):46–57, 2016.
- [4] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1):22–32, 2014.
- [5] R. Mueller-Mach, G.O. Mueller, M.R. Krames, and T. Trottier. High power phosphor converted light emitting diodes based on III nitrides. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(2):339–345, 2002.
- [6] Y. Narukawa, J. Narita, T. Sakamoto, K. Deguchi, T. Yamada, and T. Mukai. Ultra-high efficiency white light emitting diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(10):1084, 2006.
- [7] A. Krost and A. Dadgar. Gan-based devices on si. *Physica status solidi*, 194(2):361–375, 2002.
- [8] H. Luo, J.K. Kim, E.F. Schubert, J. Cho, C. Sone, and Y. Park. Analysis of high-power packages for phosphor-based white-light-emitting diodes. *Applied physics letters*, 86(24):243505, 2005.
- [9] H.J. Chiu, Y.K. Lo, J.T. Chen, S.J. Cheng, C.Y. Lin, and S.C. Mou. A high-efficiency dimmable led driver for low-power lighting applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2):735–743, 2010.
- [10] A. A. Efremov, N. I. Bochkareva, R. I. Gorbunov, D. A. Lavrinovich, Y. T. Rebane, D. V. Tarkhin, and Y. G. Shreter. Effect of the joule heating on the quantum efficiency and choice of thermal conditions for high-power blue ingan/gan leds. *Semiconductors*, 40(5):605–610, 2006.

- [11] H. Y. Chen, W. Y. Lam, J. D. Luo, Y. L. Ho, B. Z. Tang, D. B. Zhu, M. Wong, and H. S. Kwok. Highly efficient organic light-emitting diodes with a silole-based compound. *Applied physics letters*, 81(4):574–576, 2002.
- [12] N. F. Gardner, J. C. Kim, J. J. Wierer, Y. C. Shen, and M. R. Krames. Polarization anisotropy in the electroluminescence of m-plane ingan–gan multiple-quantum-well light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 86(11):111101, 2005.
- [13] S. H. Yu, K. S. Lee, and S. J. Yook. Natural convection around a radial heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14):2935–2938, 2010.
- [14] N. Narendran and Y. Gu. Life of led-based white light sources. *Journal of display technology*, 1(1):167, 2005.
- [15] M. Bürmen, F. Pernuš, and B. Likar. Led light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their assessment. *Measurement science and technology*, 19(12):122002, 2008.
- [16] Jr. N. Holonyak and S. F. Bevacqua. Coherent (visible) light emission from Ga (As_{1-x}P_x) junctions. *Applied Physics Letters*, 1(4):82–83, 1962.
- [17] Seoul Semiconductor. www.seoulsemicon.com. 2008.
- [18] M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, and M. G. Craford. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *Journal of display technology*, 3(2):160–175, 2007.
- [19] F. M. Sterank, J. Bhat, D. Collins, L. Cook, M. G. Craford, R. Fletcher, N. Gardner, P. Grillot, W. Goetz, M. Keuper, et al. High power leds technology status and market applications. *Physica status solidi (a)*, 194(2):380–388, 2002.
- [20] D. A. Steigerwald, J. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin, and S. L. Rudaz. Illumination with solid state lighting technology. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 8(2):310–320, 2002.
- [21] Nichia Corporation. www.nichia.com, 2008.
- [22] Philips Lumileds Lighting Company. www.lumileds.com, 2008.
- [23] www.ledwaves.com, 2008.

- [24] Philips Lighting Company. www.nam.lighting.philips.com/us/ecatalog/literature. 2008.
- [25] M. Ortuño, S. Gallego, A. Márquez, A. Beléndez, I. Pascual, et al. Iluminando con leds, Enero-marzo 2016.
- [26] A. Gago, A. G. Calderón, and J. Fraile. *Iluminación con tecnología LED*. Editorial Paraninfo, 2012.
- [27] T. Taguchi. Present status of energy saving technologies and future prospect in white led lighting. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3(1):21–26, 2008.
- [28] T. Taguchi. Technical trends and future view of white led lighting, headline review. *OHM*, 2004(5):8–9, 2004.
- [29] T. Taguchi. Latest technology of led lighting. *OHM, Supplement*, 2006(11):10–16, 2006.
- [30] Año de la luz. www.light2015.org/Home.com, 2008.
- [31] H. J. Chiu, Y. K. Lo, J. T. Chen, S. J. Cheng, C. Y. Lin, and S. C. Mou. A high-efficiency dimmable led driver for low-power lighting applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2):735–743, 2010.
- [32] C. Y. Wu, T. F. Wu, J. R. Tsai, Y. M. Chen, and C. C. Chen. Multistring led backlight driving system for lcd panels with color sequential display and area control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(10):3791–3800, 2008.
- [33] E. Balvis, R. Bendana, H. Michinel, and P. F. de Cordoba. Temperature stabilization of high-power led chips using low-cost passive heat sinks. In *Microoptics Conference (MOC), 2013 18th*, pages 1–2. IEEE, 2013.
- [34] Maxim-Dallas Semiconductor. Why drive white leds with constant current, 2004.
- [35] C. H. Lin. Digital-dimming controller with current spikes elimination technique for lcd backlight electronic ballast. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(6):1881–1888, 2006.
- [36] S. J. Choi, K. C. Lee, and B. H. Cho. Design of fluorescent lamp ballast with pfc using a power piezoelectric transformer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(6):1573–1581, 2005.

- [37] S. K. Kim, H. S. Han, Y. J. Woo, and G. H. Cho. Detection and regulation of ccfl current and open-lamp voltage while keeping floating condition of the lamp. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(2):707–709, 2006.
- [38] A. P. Malvino, A. Castro, J. Luis, C. López, et al. *Principios de electrónica*. McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- [39] S. Lee. Optimum design and selection of heat sinks. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 18(4):812–817, 1995.
- [40] NH: Aavid Engineering. Aavid catalog no. 1200, thermal management, 1989.
- [41] R. E. Sanders. Technology innovation in aluminum products. *JOM*, 53(2):21–25, 2001.
- [42] Aluminum Association. *Aluminum standards and data*. Aluminum Association, 1979.
- [43] Aluminios y metales. www.aluminiosymetalesunicornio.com.mx/6061.htm. 2008.
- [44] W. Diewald. Nuevas posibilidades de iluminación con led. *Técnica Industrial. Especial Electricidad y Electrónica*, pages 42–44, 2004.
- [45] G. M. García, P. Francia, R. San Martí, and H. Solano. *Contaminación lumínica: una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2012.
- [46] A. Sánchez, J. Castaño, J. Zamorano, S. Pascual, M. Ángeles, L. Cayuela, G. Martínez, P. Challupner, and C. Kyba. Atlas of astronaut photos of earth at night. *Astronomy & Geophysics*, 55(4):4–36, 2014.
- [47] STARS4ALL initiative. <http://citiesatnight.org/>, 2018.
- [48] M. Rol, B. Otálora, N. Blas, A. Carrión, E. Tudela, J. Pérez, et al. El lado oscuro de la luz: efectos de la contaminación lumínica sobre la salud humana. *Física y sociedad*.
- [49] C. H. Dorremochea, J. M. O. Martorell, and F. J. Sora. La iluminación con led y el problema de la contaminación lumínica. *Cel Fosc*, 2011.
- [50] R. Chepesiuk. Extrañando la oscuridad: los efectos de la contaminación lumínica sobre la salud. *Salud pública de México*.
- [51] J. Calabuig, J. Almela, and G. Alfaro. La gestión de la contaminación lumínica y su impacto sobre la biodiversidad. *Física y sociedad*, (21):12–14, 2011.

- [52] P. Horts. Contaminación lumínica, la. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 1999.
- [53] R. M. Eisberg, R. Resnick, L. Cota, et al. *Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. 1994.
- [54] SolidWorks-Users Manual. *Dassault Systemes SolidWorksCorporation*. Concord, MA, SolidWorks Corp, 2009.
- [55] E. Balvís, R. Bendana, H. Michinel, P. F. de Córdoba, and A. Paredes. Analysis of a passive heat sink for temperature stabilization of high-power led bulbs. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 605, page 012005. IOP Publishing, 2015.
- [56] Solidworks. www.solidworks.com, 2018.
- [57] J. C. Lam and S. C. Hui. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. *Building and Environment*, 31(1):27–39, 1996.
- [58] R. Carrasco, P. Fernández de Córdoba, L. Garcia-Raffi, and J. Sanchis. *Métodos de simulación Monte Carlo y sus aplicaciones*. Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
- [59] G. C. Rodríguez, A. C. Andrés, F. D. Muñoz, J. M. C. López, and Y. Zhang. Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. *Energy and Buildings*, 67:79–87, 2013.
- [60] R. Robledo Fava. *Desarrollo de modelo matemático y análisis de sensibilidad para el estudio energético de edificaciones*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [61] V. A. Dakwale, R. V Ralegaonkar, and S. Mandavgane. Improving environmental performance of building through increased energy efficiency: A review. *Sustainable Cities and Society*, 1(4):211–218, 2011.
- [62] B. Lin and H. Liu. Co2 emissions of china’s commercial and residential buildings: Evidence and reduction policy. *Building and Environment*, 92:418–431, 2015.
- [63] C. C. Chou, C. T. Chiang, P. Y. Wu, C. P. Chu, and C. Y. Lin. Spatiotemporal analysis and visualization of power consumption data integrated with building information models for energy savings. *Resources, Conservation and Recycling*, 123:219–229, 2017.
- [64] W. J. Fisk. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1):537–566, 2000.

- [65] D. Cali, P. Matthes, K. Huchtemann, R. Streblow, and D. Müller. Co2 based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings. *Building and Environment*, 86:39–49, 2015.
- [66] N. Kok, M. McGraw, and J. M. Quigley. The diffusion of energy efficiency in building. *The American Economic Review*, 2011.
- [67] Hernandez Luna M., Robledo Fava R., Fernandez De Cordoba Castella P., Paredes A., Michinel Alvarez H., and Zaragoza Fernandez S. Use of statistical correlation for energy management in office premises adopting techniques of the industry 4.0. *DYNA*, 93(6):602–60, 2018.
- [68] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert, and W. J. Fisk. Is co2 an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate co2 concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12):1671, 2012.
- [69] T. Sharmin, M. Gül, X. Li, V. Ganev, I. Nikolaidis, and M. Al-Hussein. Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region. *Sustainable Cities and Society*, 13:57–68, 2014.
- [70] Z. Pei, B. Lin, Y. Liu, and Y. Zhu. Comparative study on the indoor environment quality of green office buildings in china with a long-term field measurement and investigation. *Building and Environment*, 84:80–88, 2015.
- [71] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. *Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2002.
- [72] E. Balvís, O. Sampedro, S. Zaragoza, A. Paredes, and H. Michinel. A simple model for automatic analysis and diagnosis of environmental thermal comfort in energy efficient buildings. *Applied energy*, 177:60–70, 2016.
- [73] P. A. Mathew, L. N. Dunn, M. D. Sohn, A. Mercado, C. Custudio, and T. Walter. Big-data for building energy performance: Lessons from assembling a very large national database of building energy use. *Applied Energy*, 140:85–93, 2015.
- [74] A. S. O. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele, and O. A. Akinola. User satisfaction-induced demand side load management in residential buildings with user budget constraint. *Applied Energy*, 187:352–366, 2017.
- [75] I. Barbeito, S. Zaragoza, J. Tarrío-Saavedra, and S. Naya. Assessing thermal comfort and energy efficiency in buildings by statistical quality control for autocorrelated data. *Applied energy*, 190:1–17, 2017.

- [76] A. H. dos Santos, M. T. W. Fagá, and E. M. dos Santos. The risks of an energy efficiency policy for buildings based solely on the consumption evaluation of final energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1):70–77, 2013.
- [77] Y. Hirano, T. Ihara, and Y. Yoshida. Estimating residential co2 emissions based on daily activities and consideration of methods to reduce emissions. *Building and Environment*, 103:1–8, 2016.
- [78] B. Rosselló-Batle, C. Ribas, A. Moià-Pol, and V. Martínez-Moll. Saving potential for embodied energy and co2 emissions from building elements: A case study. *Journal of Building Physics*, 39(3):261–284, 2015.
- [79] Wagner D. Perioperative hypothermia: management strategies. *Medwave*, 7:e2796, 2007.
- [80] En Iso. 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005.
- [81] National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) – Earth System. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo, 2008.
- [82] P. Diagram. General properties and uses of carbon dioxide. *Global CCS Institute*, 2014.
- [83] D. R. Hershey. Digging deeper into helmont’s famous willow tree experiment. *The American Biology Teacher*, 53(8):458–460, 1991.
- [84] B. T.h Nguyen, J. Lehmann, W. C. Hockaday, S. Joseph, and C. A. Masieello. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environmental science & technology*, 44(9):3324–3331, 2010.
- [85] Kaufman D. G. and Franz C. M. Biosphere 2000: protecting our global environment. *Environmental science & technology*, 44(9):3324–3331, 2010.
- [86] National Research Council. Ocean acidification: A national strategy to meet the challenges of a changing ocean. *Environmental science & technology*, 44(9):3324–3331, 2010.
- [87] John M. E. and Howard P. <https://cnx.org/contents/s8hh0ooc@9.10:1-kv9fus6@4/biogeochemical-cycles>. 2018.
- [88] P. N. Pearson and M. R. Palmer. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 406(6797):695, 2000.

- [89] R. Chang. *Principios esenciales de química general*, Raymond Chang. McGraw Hill. Madrid. ES, 2006.
- [90] Dräger Safety Hispania S. A. *Introducción a los Sistemas de Detección de Gases*, 2009.
- [91] R. A. Serway, J. W. Jewett, A. E. G. Hernández, and E. F. López. *Física para ciencias e ingeniería*, volume 6. Thomson, 2005.
- [92] J. Balcells, J. L. Romeral, and J. L. R. Martínez. *Autómatas programables*, volume 1089. Marcombo, 1997.
- [93] J. D. Turner and M. Hill. *Instrumentation for engineers and scientists*. 1999.
- [94] R. P. Areny. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [95] Data Acquisition. Control handbook. *Cleveland, OH: Keithley Instruments*, pages 5–18, 2001.
- [96] AXIO MET. <https://es.axiomet.eu/page/1954/monitoreo-de-la-calidad-del-aire-en-los-espacios-cerradosg>. 2018.
- [97] UNE Norma. 100-011: 1991. *Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de los locales*, 1991.
- [98] T. Hartmann, E. Heinz, and E. Paul. Planungspraxis Lüftung in wohngebäuden-planung und umsetzung nach din 1946-6. Forum Verlag Herkert GmbH, 2014.
- [99] G. Marques and R. Pitarma. Monitoring energy consumption system to improve energy efficiency. In *World Conference on Information Systems and Technologies*, pages 3–11. Springer, 2017.
- [100] T. Ekwevugbe, N. Brown, V. Pakka, and D. Fan. Real-time building occupancy sensing using neural-network based sensor network. In *Digital Ecosystems and Technologies (DEST), 2013 7th IEEE International Conference on*, pages 114–119. IEEE, 2013.
- [101] P. Plaza, E. Sancristobal, G. Carro, M. Castro, and E. Ruiz. Wireless development boards to connect the world. In *Online Engineering & Internet of Things*, pages 19–27. Springer, 2018.
- [102] R. A. Light. Mosquitto: server and client implementation of the mqtt protocol. *Journal of Open Source Software*, 2(13), 2017.
- [103] S. Naya, J. Tarrío-Saavedra, Zaragoza S., and others. Statistical quality control with functional data. an application to energy efficiency. *Proceedings of the 60th ISI World Statistics Congress*, pages 3425–3432, 2015.

- [104] R. Cao-Abad, M. Francisco-Fernández, and S. Naya-Fernández. Estadística básica aplicada. *Proceedings of the 60th ISI World Statistics Congress*, 1998.
- [105] Team, R Core. www.R-project.org, 2016.
- [106] E. Perea, A. Mera, L. Santos, A. Alvarezs, E. Lopez, J. Martinez, A. Siddiqui, and M. Stadler. Decision support system for efficient use of energy in buildings. *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 2:13, 2013.
- [107] Y. T. Chae, R. Horesh, Y. Hwang, and Y. M. Lee. Artificial neural network model for forecasting sub-hourly electricity usage in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 111:184–194, 2016.
- [108] V. Congradac and F. Kulic. Hvac system optimization with co2 concentration control using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 41(5):571–577, 2009.
- [109] O. Pereira, A. Rodríguez, A. I. Fernández, J. Barreiro, and L. N. de Lacalle. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of aisi 304. *Journal of Cleaner Production*, 139:440–449, 2016.

Anexo I: Diseño de una luminaria LED en SolidWorks®

.0.1. Conceptos básicos de SOLIDWORKS®

El software CAD SOLIDWORKS® es una aplicación de automatización de diseño mecánico que permite a los diseñadores crear ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, y producir modelos y dibujos detallados Fig. 1 [62, 64].



Figura 1: Pantalla principal SOLIDWORKS®.

SOLIDWORKS® emplea un procedimiento de **diseños en 3D**. Al diseñar una pieza, desde el croquis inicial hasta el resultado final, se está creando un modelo en 3D. A partir de este modelo, se pueden crear dibujos en 2D o componentes de relaciones de posición que consten de piezas o sub-ensamblajes para crear ensamblajes en 3D. También se pueden crear dibujos en 2D a partir de los ensamblajes en 3D (Fig. 2).

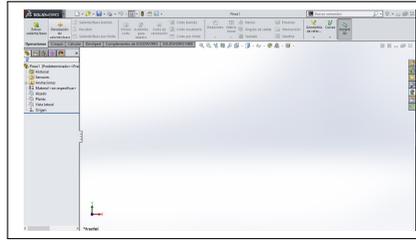


Figura 2: Pieza, ensamblaje o 2D.

Cuando se diseña un modelo en SOLIDWORKS® , se puede visualizar en 3D para ver su aspecto una vez fabricado. El **sistema basado en componentes** es una de las prestaciones más versátiles de la aplicación SOLIDWORKS® , ya que posee gran capacidad para reflejar cualquier cambio realizado en una pieza en todos los dibujos o ensamblajes asociados a dicha pieza.

- *Terminología:* estos términos se emplean en todo el software SOLIDWORKS® y en su documentación.
 1. *Origen:* tiene el aspecto de dos flechas azules y representa el punto de coordenadas (0, 0, 0) del modelo.
 2. *Plano:* geometría constructiva plana. Puede utilizar planos con el fin de agregar un croquis en 2D, una vista de sección de un modelo, etc.
 3. *Eje:* línea recta utilizada para crear la geometría, las operaciones o las matrices del modelo.
 4. *Cara:* límites que contribuyen en la definición de la forma de un modelo o superficie. Una cara es un área (plana o no) de un modelo o superficie susceptible de ser seleccionada.
 5. *Arista:* lugar en que se cruzan dos o más caras y se unen.
 6. *Vértice:* punto en que hacen intersección dos o más líneas o aristas.
- *Interfaz de usuario:* la aplicación SOLIDWORKS® contiene herramientas y posibilidades de interfaz de usuario que facilitan la creación y edición de los modelos de forma eficiente, entre las que se incluyen:
 - *Funciones de Windows:* la aplicación SOLIDWORKS® contiene funciones conocidas de Windows como arrastrar y cambiar el diseño de las ventanas, etc. Muchos de los iconos, como el de impresión, abrir, guardar, cortar, pegar, etc., son parte de la aplicación de SOLIDWORKS®.

- *Ventanas de documentos de SOLIDWORKS®*: las ventanas de documento de SOLIDWORKS® tienen los paneles:
 - **Gestor de diseño del FeatureManager**: muestra una lista de la estructura de la pieza, ensamblaje o dibujo.
 - **El PropertyManager**: brinda configuraciones para muchas funciones tales como: croquis, operaciones de redondeo y relaciones de posición de ensamblaje.
 - **Configuration Manager**: permite crear, seleccionar y ver múltiples configuraciones de piezas y ensamblajes en un documento. Las configuraciones son variaciones de una pieza o ensamblaje dentro de un documento individual.
- *Selección e información sobre las funciones*: SOLIDWORKS® permite llevar a cabo las tareas de distintas maneras, también ofrece información a medida que lleva a cabo una tarea como puede ser la aplicación de una operación.
 - **Menús**: puede acceder a todos los comandos de SOLIDWORKS® a través de los menús. Además utilizan las convenciones de Windows y presenta sub-menús y marcas de selección para indicar que un elemento está activo.
 - **Barra de herramientas**: contiene una serie de iconos exclusivos de herramientas específicas como *girar vista*, *matriz circular*, *círculo*, *etc.*.
 - **Administrador de comandos**: es una barra de herramientas sensible al contexto que se actualiza dinámicamente en función del tipo de documento activo.
 - **Barras contextuales**: permiten crear su propio conjunto de comandos para el modelo de pieza, ensamblaje, dibujo y croquis.
 - **Vistas preliminares**: con la mayor parte de las operaciones, la zona de gráficos presenta una vista preliminar de la operación que desea crear. Las vistas preliminares se presentan con operaciones como extrusiones base, cortar-extruir, barridos, recubrimientos, matrices y superficies.
- *Proceso de diseño*: el proceso de diseño del prototipo suele componerse de las siguientes fases:
 - Identificación de los requisitos del prototipo.

- Conceptualización del prototipo en función de las necesidades identificadas.
 - Desarrollo del prototipo según los conceptos.
 - Análisis del prototipo.
 - Generación del prototipo.
 - Construcción del prototipo.
 - Edición del prototipo, si fuera necesario.
- *Intención del diseño*: la intención del diseño determina el modo en que se desea que reaccione el prototipo, como resultado de los cambios que se realicen el mismo. Es una cuestión principalmente de planificación. La manera en que se crea el prototipo determina cómo le afectan los cambios.
 - *Método de diseño*: antes de diseñar el prototipo, es conveniente planear un método de creación del prototipo. Después de identificar las necesidades y aislar los conceptos adecuados, se puede empezar a desarrollar el prototipo:
 - **Croquis**: el usuario crea los croquis y decide cómo se desea acotar y dónde se va a aplicar las relaciones de posición.
 - **Operaciones**: el usuario selecciona las operaciones adecuadas, como extrusiones y redondeos, determina las mejores operaciones que puede aplicar y decide en qué orden va a aplicarlas.
 - **Ensamble**: el usuario selecciona los componentes que tendrán una relación de posición y los tipos de relaciones de posición a aplicar.
 - *Croquis*: es la base para la mayoría de los prototipo 3D; la creación de un prototipo por lo general empieza con un croquis. A partir del croquis, se pueden crear operaciones y se pueden combinar dos o más operaciones para crear una pieza. Un croquis es un perfil o sección transversal 2D. Para crear un croquis en 2D, se debe utilizar un plano o una cara plana. Además de los croquis en 2D, se pueden crear croquis en 3D que contengan un eje Z, junto a los ejes X e Y. Los croquis constan de los siguientes elementos:
 - **Origen**: los croquis comienzan en el origen, lo cual brinda una posición para el croquis.
 - **Planos**: se pueden crear planos en documentos de pieza o ensamble. En ciertos prototipos, el plano afecta no sólo a la manera en que aparece el modelo de una vista isométrica estándar (3D). Los planos estándar tienen las orientaciones frontal, superior y derecha.

- **Cotas:** puede especificar cotas entre entidades, como las longitudes y los radios. Al modificar las cotas, cambia el tamaño y la forma de la pieza.
 - **Definiciones de croquis:** los croquis pueden estar completamente definidos, insuficientemente definidos o definidos en exceso. No es necesario definir los croquis completamente antes de utilizarlos para crear operaciones. Sin embargo, para terminar una pieza debería definir completamente los croquis para mantener la intención del diseño.
 - **Relaciones:** establecen relaciones geométricas tales como igualdad y tangencia entre las entidades del croquis.
 - **Complejidad del croquis:** un croquis sencillo es fácil de crear y de actualizar y se reconstruye más rápidamente. Una manera de simplificar el diseño es aplicar las relaciones a medida que diseña. También se puede recurrir a la repetición y a la simetría.
- *Operaciones:* una vez finalizado el croquis, se puede crear un prototipo en 3D empleando operaciones como una extrusión o revolución. Algunas operaciones que se basan en los croquis son formas como salientes, cortes y taladros. Otras operaciones que se basan en los croquis, como los recubrimientos y los barridos, utilizan un perfil a lo largo de su recorrido. Existen operaciones como redondeos, chaflanes o vaciados y se denominan *operaciones aplicadas*.
 - *Ensamblajes:* se pueden combinar varias piezas que encajen con el fin de crear ensamblajes. Las piezas se integran mediante un ensamblaje con *Relaciones de posición*, las cuales definen la dirección permitida de movimiento de los componentes.
 - *Dibujos:* los dibujos se crean a partir de modelos de pieza o de ensamblaje. Pueden verse en varias vistas como las 3 vistas estándar y las vistas isométricas (3D). Además, se pueden importar cotas desde el documento de modelo y agregar anotaciones como símbolos de datos indicativos.
 - *Edición de modelos:* se puede utilizar el gestor de diseño del *FeatureManager* y el *PropertyManager* de SOLIDWORKS® para editar croquis, dibujos, piezas o ensamblajes. También se pueden editar operaciones y croquis seleccionándolos directamente en la zona de gráficos. Las funciones de edición son:
 - *Editar un croquis:* puede seleccionar un croquis en el gestor de diseño del *FeatureManager* y editarlo. También se puede seleccionar la operación que desea editar directamente en la zona de gráficos.

- *Editar una operación*: una vez que se crea una operación, se puede cambiar la mayoría de sus valores. Se utiliza *Editar operación* para visualizar el *PropertyManager* adecuado.
- *Ocultar y visualizar*: con cierta geometría, se puede ocultar o mostrar uno o más sólidos de superficie. También se pueden ocultar y mostrar croquis, planos y ejes en todos los documentos, así como vistas, líneas y componentes en los dibujos.
- *Suprimir y desactivar supresión*: se puede seleccionar cualquier operación desde el gestor de diseño del *FeatureManager* y suprimir la operación para ver el modelo sin ella. Cuando se suprime una operación, ésta se elimina temporalmente del modelo, pero no se elimina definitivamente. La operación desaparece de la vista del modelo. Después, puede desactivar la supresión de la operación para ver el modelo en su estado original.
- *Retroceder*: cuando se trabaje en un modelo con varias operaciones, puede retroceder en el gestor de diseño del *FeatureManager* para ver el modelo en un estado anterior. Al mover la barra de retroceder, aparecen todas las operaciones del modelo hasta el estado retrocedido y hasta el momento en que devuelva el gestor de diseño del *FeatureManager* a su estado original.

.0.2. Aspectos generales

De forma general, cuando se trabaja con simulaciones en este software, debemos de tener en cuenta los siguientes propiedades del entorno de trabajo [62, 64]:

- **Espacio de trabajo** el disipador es un objeto tridimensional, por lo tanto la simulación del problema fue ejecutada en un ambiente 3D.
- **Geometría**: la forma del disipador fue importada mediante la herramienta de importación del programa que permite insertar formas diseñadas con otro tipo de software.
- **Materiales**: se utilizaron las propiedades correspondientes al aluminio anodizado negro (Al 1060).
- **Física**: se especifican los fenómenos físicos influyentes en el estudio; se trabaja con las ecuaciones de transferencia de calor presentadas en capítulos anteriores. anterior.
- **Malla**: proporcionada por el programa.

.0.3. Estudio

Este tipo de proceso se realiza durante la **Simulación**, que se lleva a cabo siguiendo los pasos que se enumeran a continuación [62, 64]:

1. **Definir el tipo de estudio:** el programa ofrece una amplia variedad de estudios, por ejemplo, estudios de frecuencia, fatiga, dinámica lineal, etc. En este caso específico, elegiremos el estudio térmico para analizar la transferencia de calor a través de nuestra pieza.
2. **Ingresar tipo de material:** este software tiene una extensa base de datos de materiales que incluyen sus propiedades y se debe seleccionar el indicado; para este caso, el material que utilizamos fue una aleación de Aluminio 1060.
3. **Ingresar tipos de contactos:** es importante en un análisis térmico el contacto de las partes de nuestra pieza; esto es debido a que hay cambios en los materiales que afectan a la transferencia de calor. Estos contactos pueden ser especificados con o sin resistencias, o en su caso, aislados completamente. Para la unión que contempla el disipador y el chip LED, se estableció una resistencia térmica de $4 * 10^{-6} \frac{^{\circ}K \cdot m^2}{W}$ que representaría la existencia de una lámina de grafito entre las paredes.
4. **Ingresar cargas:** en este caso específico, hacemos referencia a las cargas térmicas. Para un estudio térmico, se incluyen la convección, conducción, radiación y potencia de calor generada por el chip LED y por los flujos de calor externos.
5. **Generar la malla de elementos finitos:** el programa nos da la opción de seleccionar el tamaño de los elementos finitos, sin embargo, se sugiere utilizar la malla que el programa define por defecto.
6. **Ejecutar el programa:** finaliza la solución al problema, en nuestro caso, la distribución de temperatura desde el chip hasta el disipador en su totalidad.

Después de obtener la solución al problema de la temperatura en la región del LED, se puede hacer un estudio de diseño mediante una parametrización de los valores importantes de la geometría de la pieza de estudio. SOLIDWORKS® genera la solución al problema térmico de varias geometrías de forma simultánea, permitiendo escoger la solución que mejor se acerque a los objetivos planeados.

A continuación presentamos el diseño paso a paso de una luminaria LED diseñada en SOLIDWORKS® que está constituido por el chip LED y el disipador de aluminio anodizado.

Nuevo diseño

Al abrir SOLIDWORKS®, nos aparecen varias opciones, se selecciona la opción deseada dependiendo de lo que se vaya a realizar, Fig. 3.

En el croquis *Planta* es donde vamos a trabajar. Procedemos con el diseño del chip LED, que se basa en un cuadrado de 25 mm de lado, Fig. 4, con 1 mm de espesor, Fig. 5.



Figura 3: Nuevo documento en SOLIDWORKS®.

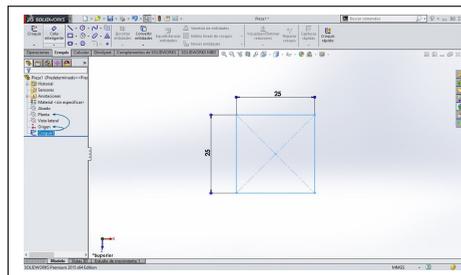


Figura 4: Chip LED en 2D.

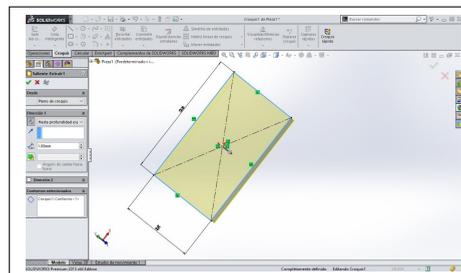


Figura 5: Operación Extruir.

Finalmente obtenemos el chip LED en 3D, Fig. 6.

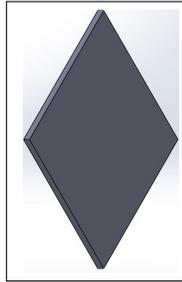


Figura 6: Chip LED en 3D.

El disipador está compuesto por un círculo de 40 mm de diámetro, Fig. 8.

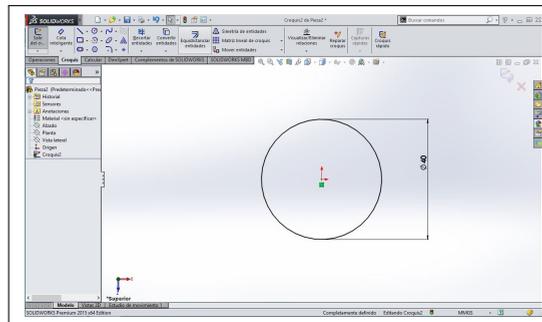


Figura 7: Cilíndro del disipador en 2D.

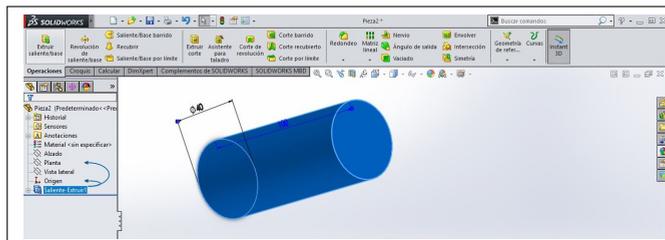


Figura 8: Cilíndro del disipador en 3D.

Después de obtener el cilindro, procederemos al diseño de las aletas del disipador, Fig. 9.

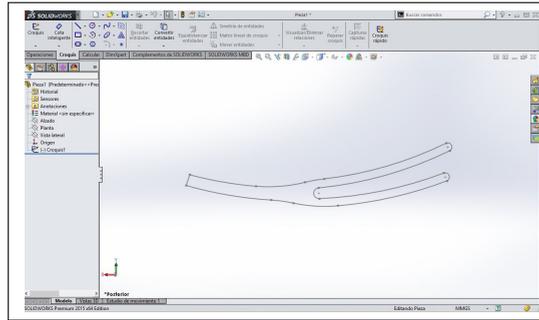


Figura 9: Aleta del disipador en 2D.

Comenzaremos añadiendo una línea recta a nuestra base del cilindro de 2 mm de largo, que va a estar unida al diámetro de la base circular, Fig. 10.

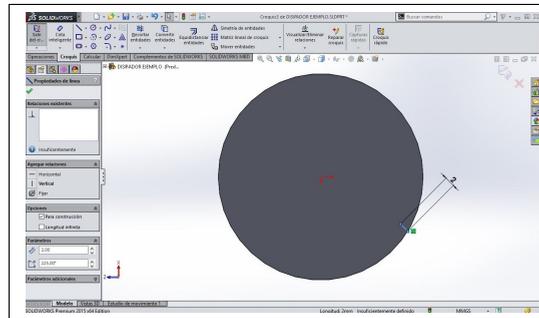


Figura 10: Paso previo a la unión de la aleta.

El siguiente paso es unir la aleta de la Fig. 9. Para ello se seleccionan todos los segmentos de la aleta y se copia directamente al archivo donde se tiene el cilindro, Fig. 10; a continuación se selecciona *Croquis*, y después *Mover Entidades* y aparece el menú de la Fig. 11.

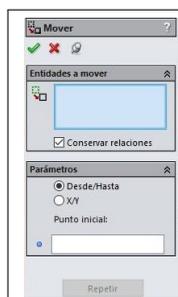


Figura 11: Mover entidades (menú).

La siguiente *Operación* que vamos a realizar es *Matriz Circular* y se lleva a cabo como se muestra en la Fig. 12.

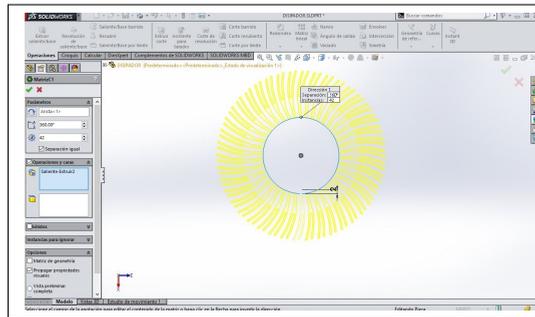


Figura 12: Operación: Matriz circular.

Ya que se tienen las dos partes de la luminaria LED, chip y disipador, procedemos a realizar el ensamble de las dos piezas, como se observa en la Fig. 13.



Figura 13: Ensamble de la luminaria LED.

Aparecerán las figuras en nuestro espacio de trabajo, chip LED y disipador; el siguiente paso es unir las dos piezas, como se observa en la Fig. 14.

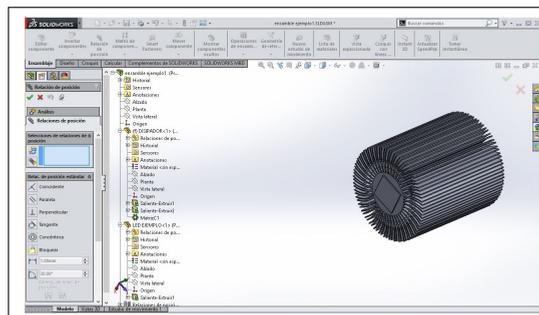


Figura 14: Ensamble del chip LED y el disipador.

Podemos hacer diferentes modelos de aletas y disipadores basándonos en los pasos utilizados para obtener la luminaria LED de la Fig. 14. En las Fig. 15 y se añaden diferentes modelos y vistas.

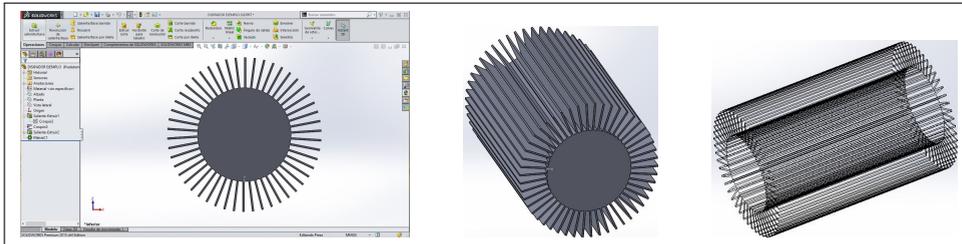


Figura 15: Luminaria con aleta rectangular.

Resultados de simulaciones en SOLIDWORKS®

Una vez importada la geometría del disipador mediante las herramientas del programa, después de haber establecido todos los parámetros y realizado la configuración específica necesaria, en esta sección se presentan los resultados que corresponden al módulo de transferencia de calor de la luminaria LED.

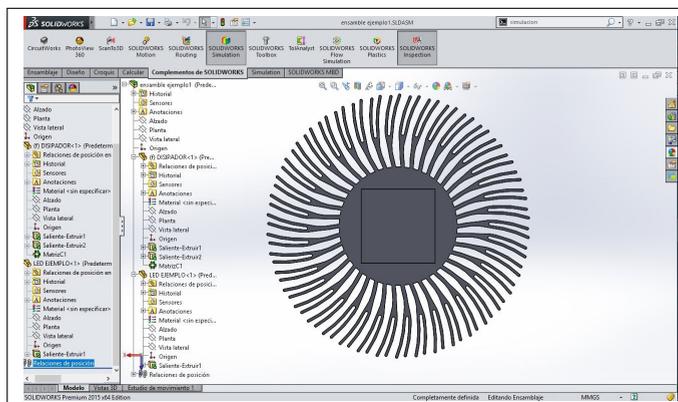


Figura 16: SOLIDWORKS Simulation.

El estudio *Tipo Térmico* crea un estudio térmico para calcular la distribución de temperatura en sólidos debido a la conducción, convección y radiación.

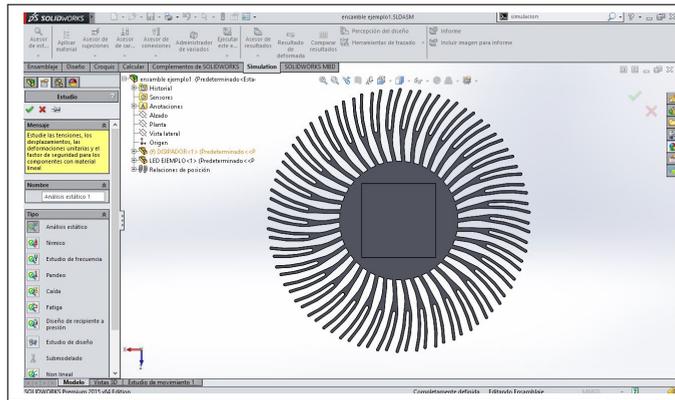


Figura 17: Estudio Tipo: Térmico.

El siguiente paso es definir el material del disipador, Fig. 18; en este caso vamos a utilizar una aleación de *Aluminio* y se selecciona la *Aleación 1060*.

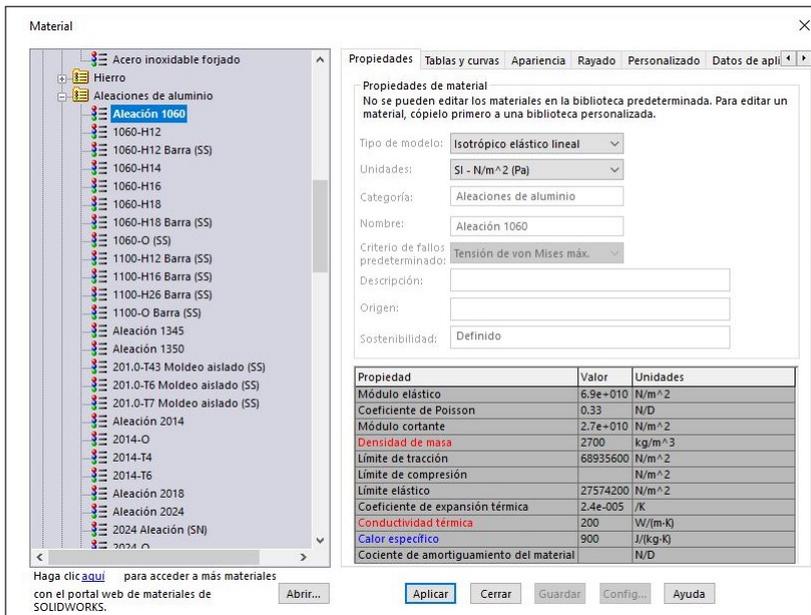


Figura 18: Material: Aluminio-Aleación 1060.

Para rectificar que se haya aplicado el material a todo el disipador, en la Fig. 19 se observa que, efectivamente, tanto el disipador como el chip LED tienen el mismo material.



Figura 19: Aluminio-Aleación 1060 en chip y disipador.

Es el momento de definir la *Resistencia térmica*, que sólo está disponible para estudios térmicos. El valor de la resistencia térmica es de $4 * 10^6 \frac{K \cdot m^2}{W}$.

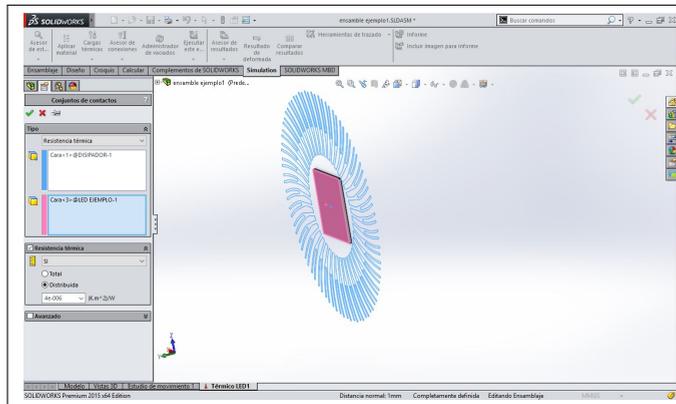


Figura 20: Resistencia térmica.

Cargas y restricciones térmicas

Las cargas y restricciones térmicas, excepto para la temperatura que también se usa en los estudios estructurales, sólo son accesibles para estudios térmicos.

Para estudios térmicos de estado estacionario con una fuente de calor, se debe definir un mecanismo para disipar el calor. De lo contrario, el análisis se detiene puesto que las temperaturas aumentan sin límite.

Los siguientes tipos de cargas y restricciones están disponibles para estudios térmicos:

1. **Temperatura:** permite definir la condición de contorno de la temperatura para su uso en análisis estructurales y térmicos.

2. **Convección:** se utiliza para aplicar la condición de contorno de convección a las caras seleccionadas del prototipo en estudios térmicos (estado estacionario y transitorio).
3. **Flujo de calor:** se puede aplicar a las caras seleccionadas. El flujo de calor sólo se utiliza en estudios térmicos. Para estudios térmicos de estado estacionario se puede definir el flujo de calor dependiente de la temperatura. Para estudios térmicos transitorios, puede definir el flujo de calor dependiente de la temperatura o del tiempo y un termostato para controlar el flujo de calor.
4. **Potencia calorífica:** permite aplicar energía térmica a los vértices, aristas, caras y componentes.
5. **Radiación:** permite aplicar radiación de superficie al ambiente o radiación de superficie a superficie.

Los estudios térmicos calculan temperaturas, gradientes de temperatura y flujos de calor en base a la generación de calor y a las condiciones de conducción, convección y radiación. Los estudios térmicos pueden ayudar a evitar condiciones térmicas no deseadas, tales como el sobrecalentamiento y la fusión.

Potencia calorífica

Define una energía térmica para las entidades seleccionadas en el estudio térmico activo, en este caso vamos a utilizar el valor de 50 W, que es la potencia del LED con la que vamos a trabajar.

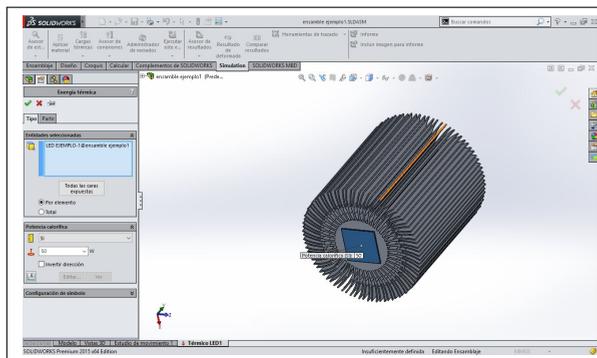


Figura 21: Potencia calorífica.

En este caso vamos a utilizar un valor de $5.25 \frac{W}{\text{cm}^2}$ al *Coefficiente de Convección* y de 303.15°K en *Temperatura ambiente*.

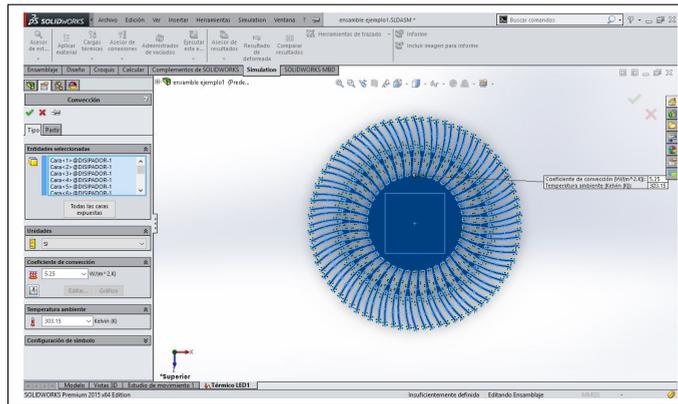


Figura 22: Convección del chip y el disipador.

Mallado

Las opciones de *Mallado* son factores esenciales en la determinación de la calidad de la malla y, por tanto, de los resultados. Los resultados basados en otra configuración de preferencia deben coincidir si se utiliza un tamaño de elemento que sea suficientemente pequeño. Existen dos opciones de mallado, *Estándar* y *Basado en la Curvatura*, Fig.23 y 24.

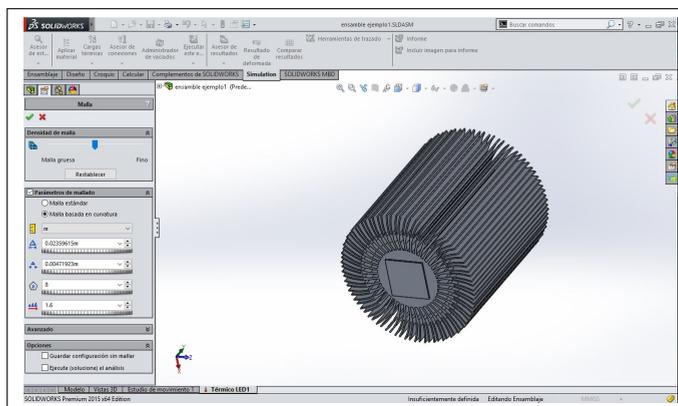


Figura 23: Parámetros del Mallado.

En la Fig. 24 podemos observar el mallado final que se aplicó.

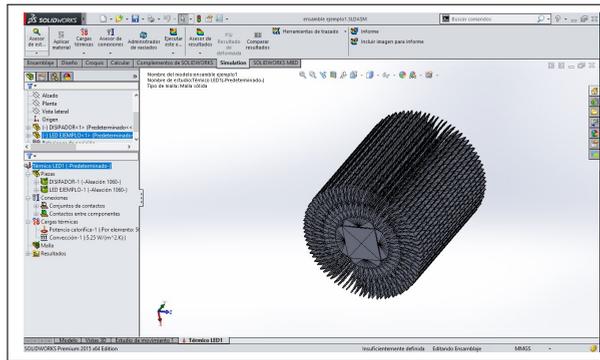


Figura 24: Malla basada en curvatura.

Térmico: resultados

finalmente, para obtener la simulación térmica, se le da click derecho en *Térmico* y aparecen varias opciones entre ellas *Ejecutar*, Fig. 25.

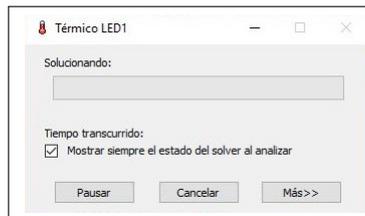


Figura 25: Proceso de la simulación.

Las *Opciones de gráfico* se pueden editar, cambiamos a *Flotante* y en *Decimales* ponemos el valor de 0, Fig.26.

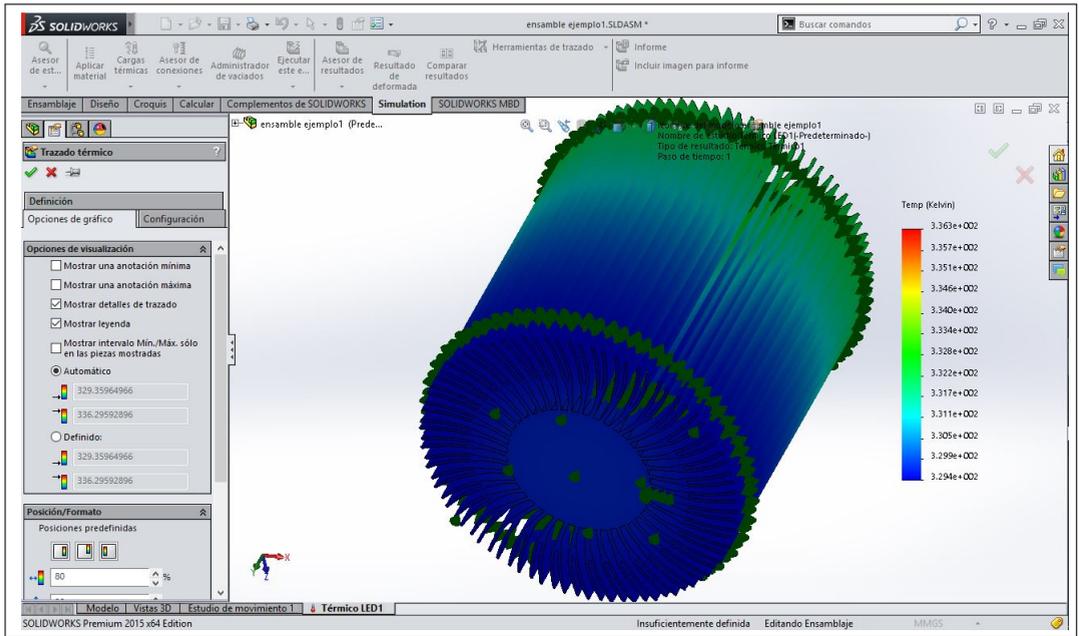


Figura 26: Opciones de gráfico.